



TIELAITOS

Suomen tieliikenteen polttoaineperäisten päästöjen aiheuttamat ympäristökustannukset

LOPPURAPORTTI 60K01899-Q070-002a
Helmikuu 1999



ENERGIA-EKONO

Jaakko Pöyry Group

TIIVISTELMÄ

Projektin tavoitteena oli määrittää, mitata ja arvottaa tieliikenteen polttoaineperäisten päästöjen aiheuttamat ympäristökustannukset. Tarkastelukohteena oli Suomen koko tieliikenne sekä tieinfrastruktuuriin kuuluvien sähkölaitteiden käyttö vuonna 1996. Liikenteen haitta-arviot kohdennettiin erikseen taajamille ja haja-asutusalueille. Sähkönkäytön ympäristökustannukset arvioitiin sähkön tuotannon ja tuontisähkön aiheuttamiin haittoihin perustuen.

Arvottamismenetelmänä käytettiin nelivaiheista vaikutuspolkumenetelmää (Impact Pathway Method). Työvaiheet sisälsivät päästö- ja pitoisuusarviot, arvion ympäristökuormituksen määrällisistä vaikutuksista sekä näiden vaikutusten taloudellisesta arvosta. Tarkasteltavia vaikutuksia olivat terveysvaikutukset (kuolleisuus ja sairastuvuus), materiaalivaikutukset (korroosio ja likaantuminen), luontovaikutukset (metsä- ja satovauriot) sekä ilmastonmuutos. Tarkasteluissa olivat mukana koko polttoaineketjut eli muutkin vaiheet kuin polttoaineiden ja sähkön käyttö.

Tieliikenteen päästöjen haittoiksi arvioitiin 5 500 milj. mk vuodessa. Haitoista valtaosa muodostuu terveysvaikutuksista ja ilmastonmuutoksen vaikutuksista. Polttoaineketjujen alkupään haittoiksi arvioitiin lisäksi noin 40 milj. mk vuodessa. Työkoneiden dieselin ja kevyen polttoöljyn käytön haittoiksi arvioitiin noin miljoona markkaa. Osa Suomessa syntyvistä päästöistä kulkeutuu ulkomaille. Näiden päästöjen haittoiksi arvioitiin 350 milj. mk vuodessa. Tieinfrastruktuurin sähkönkulutus oli noin 100 GWh vuonna 1996. Infrastruktuurin kuluttaman sähkön hankinnan haittoiksi arvioitiin kulutetulle sähkölle 5,5 p/kWh ja vuositasolla yhteensä noin 6 milj. markkaa siirtohäviöt huomioon ottaen. Tätä vastaavat polttoaineketjujen alkupään haitat arvioitiin 0,2 milj. markaksi vuodessa. Taulukossa 1 on esitetty yhteenveto haitoista.

Taulukko 1 Tieliikenteen aiheuttamat ympäristökustannukset, milj. mk/a (1997 rahassa). Lukuja on pyöristetty.

	Taajamat	Haja-asutusalueet	Yhteensä
Kuolleisuusriski	2 060	120	2 200
Sairastuvuusriski	730	70	790
Materiaalien korroosio	12	0,4	13
Likaantuminen	190	5	190
Metsien happamoituminen		9	89
Metsien otsonivauriot		34	34
Satovauriot		24	24
Ilmastonmuutos	1 150	1 080	2 220
Yhteensä, milj. mk/a	4 100	1 300	5 500
Työkoneiden päästöt			1
Infrastruktuurin sähkönkulutus			6
Polttoaineketjujen alkupää			40
Ulkomaille kulkeutuvat päästöt			350
Yhteensä, milj. mk/a			5 900

Haitta-arviot suhteutettiin myös eri ajoneuvotyyppien suoritteisiin (ks. taulukko 2). Mikäli polttoaineketjujen alkupään haitat otetaan huomioon, bensiinikäyttöisten ajoneuvojen haitta-arvioihin lisättävä 1,2 % ja dieselikäyttöisten 0,6 %. Samoin, jos ulkomaille kulkeutuvat päästöt otetaan huomioon, on bensiinikäyttöisten ajoneuvojen haitta-arvioihin lisättävä 7,7 % ja dieselikäyttöisten ajoneuvojen 5,4 %.

Taulukko 2 Eri ajoneuvojen haitat taajamissa ja haja-asutusalueilla tapahtuvassa liikennöinnissä sekä keskimäärin, mk/ajoneuvo-km (1997 rahassa)

Ajoneuvo	Taajamat	Haja-asutusalueet - p / ajoneuvo-km -	Keskimäärin
Henkilöautot, ei katalysaattoria	9,1	4,5	6,7
Henkilöautot, katalysaattori	5,6	3,7	4,6
Henkilöautot, diesel	35	3,9	19
Pakettiautot, ei katalysaattoria	13	6,6	11
Pakettiautot, katalysaattori	7,8	5,4	6,8
Pakettiautot, diesel	22	6,4	16
Linja-autot	120	19	79
Kuorma-autot, ei perävaunua	95	17	59
Kuorma-autot, perävaunu	128	25	50

Mikäli haitat kohdistetaan polttoaineiden käytölle, saadaan haitta-arvioksi bensiinille 0,82 mk/litra ja dieselille 2,02 mk/litra.

Euroopan komission rahoittamassa ExternE Transport -tutkimuksessa on tarkasteltu tieliikenteen aiheuttamia ympäristökustannuksia. Suomessa saadut tulokset ovat pääsääntöisesti alhaisempia kuin ExternE:n tapaustarkasteluissa saadut.

ABSTRACT

The objective of the project was to determine, measure and value the environmental costs caused by road traffic fuels emissions. The study reviewed road traffic in the whole of Finland and the use of electrical equipment, part of road infrastructure, in 1996. Adverse environmental impacts of road traffic were assessed separately for population centres and rural areas. The environmental costs of electricity use were estimated based on the impacts of electricity production and import.

The valuation method used was the Impact Pathway Method, which consists of four steps: emission inventory, dispersion calculations, quantification of impacts and their monetary valuation. The impacts studied included health effects (mortality and morbidity), materials damage (corrosion and fouling), ecological effects (forest and crop damage) and climate change. The review covered the entire fuel cycle, i.e. all the phases in addition to the consumption of fuel and electricity.

The cost of the damage from road traffic emissions was estimated at FIM 5 500 million per year, of which health effects and the impacts of climate change accounted for the majority. In addition, the damage from the fuel cycles (except from the fuel consumption) was estimated at FIM 40 million per year. The damage from the use of diesel and light fuel oil in road machines was estimated at one million FIM per year. Some of the emissions generated in Finland disperse beyond the national borders. The damage of these emissions was estimated at FIM 350 million per year. The electricity consumption of the road infrastructure amounted to approximately 100 GWh in 1996. The damage caused by the supply of electricity for road infrastructure was estimated at 5,5 p/kWh electricity consumed, and annually a total of FIM 6 million, when transmission losses are taken into account. Correspondingly, the damage from the fuel cycles (except from the electricity consumption) was estimated at FIM 0.2 million per year. Table 1 shows a summary of the damages.

Table 1. Environmental costs caused by road traffic, FIM million/a (in 1997 money). The numbers have been rounded.

	Population centres	Rural areas	Total
Mortality risk	2 060	120	2 200
Morbidity risk	730	70	790
Materials corrosion	12	0,4	13
Fouling	190	5	190
Forest acidification		9	89
Ozone-caused forest damage		34	34
Crop damage		24	24
Climate change	1 150	1 080	2 220
Total, FIM million/a	4 100	1 300	5 500
Emissions from road machines			1
Electricity consumption of infrastructure			6
Other phases of the fuel cycles			40
Emissions dispersing beyond national borders			350
Total, FIM million/a			5 900

The damage estimates were also proportioned to the kilometrages of different vehicle types (see Table 2). In case the damages from the fuel cycles (except from the fuel consumption) are taken into account, the damage estimates of petrol-driven vehicles should be increased by 1.2% and those of diesel vehicles by 0.6%. Likewise, if the emissions dispersing beyond our national borders are taken into account, the damage estimates of petrol-driven vehicles should be increased by 7.7% and those of diesel vehicles by 5.6%.

Table 2. Damage caused by different vehicles in population centres and rural areas and on average, FIM/vehicle-km (in 1997 money)

Vehicle	Population centres	Rural areas	Average
	- p / vehicle-km -		
Passenger cars without catalytic converter	9.1	4.5	6.7
Passenger cars with catalytic converter	5.6	3.7	4.6
Passenger cars, diesel	35	3.9	19
Vans without catalytic converter	13	6.6	11
Vans with catalytic converter	7.8	5.4	6.8
Vans, diesel	22	6.4	16
Coaches/Buses	120	19	79
Lorries without trailer	95	17	59
Lorries with trailer	128	25	50

In case the damages are allocated to the use of fuels, the damage estimate for petrol is FIM 0.82/litre and for diesel FIM 2.02/litre.

The ExternE Transport study financed by the European Commission has reviewed the environmental costs caused by road traffic. The results obtained in Finland are lower than those of the case studies in the ExternE programme.

ESIPUHE

Tielaitoksessa laadittiin vuonna 1992 ensimmäinen selvitys tieliikenteen pakokaasu- ja meluhaitoista sekä niiden kustannuksista. Selvityksen pohjalta näiden vaikutusten kustannukset otettiin mukaan tiehankkeiden yhteiskuntataloudellisiin laskelmiin. Tämän jälkeen tieliikenteen päästöjen ympäristökustannuksista on tehty kaksi selvitystä. Alan kansainvälinen tutkimus on ollut viime vuosina hyvin vilkasta. Tämän vuoksi vuoden 1997 alkupuolella julkaistu uusi selvitys, jotka perustui vuonna 1996 käytettävissä olleeseen tietoon oli tarpeen päivittää.

Selvityksen on tehnyt Energia-Ekono Oy:n muodostama asiantuntijaryhmä. Projektin vastuullisena johtajana toimi DI, KTM Tomas Otterström. Projektipäällikkönä sekä projektin pääasiallisena suorittajana toimi DI Lea Gynther sekä projekti-insinööreinä MMK Kari Hämekoski ja DI Sirpa Torkkeli.

Tielaitoksen puolelta työtä valvoivat apulaisjohtaja Pauli Velhonoja ja suunnittelija Mervi Karhula.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ESIPUHE

SISÄLLYSLUETTELO

LYHENNELUETTELO

KÄSITELUETTELO

1. JOHDANTO	13
1.1 Tutkimuksen tausta ja tavoitteet	13
1.2 Tutkimusmenetelmät	14
1.3 Tulosten luotettavuus	17
2. TIELIIKENTEEN PÄÄSTÖT	18
2.1 Suomen liikenteen päästöt	18
2.2 Tieliikenteen suoritteet ja päästöt	18
2.3 Työkoneet	21
2.4 Polttoaineketjujen päästöt	22
2.5 Päästöjen kulkeutuminen ulkomaille	24
2.6 Sähkönhankinnan päästöt	24
2.7 Tieliikenteen päästöt yhteensä	25
2.8 Resuspensio	25
3. TIELIIKENTEEN AIHEUTTAMAT PITOISUUDET	27
4. ARVOTTAMINEN	31
4.1 Kuolleisuusriski	31
4.2 Sairastuvuusriski	34
4.3 Rakennusmateriaalien rapautuminen	39
4.4 Likaantuminen	42
4.5 Happamoittavan laskeuman aiheuttamat metsävauriot	44
4.6 Otsonin aiheuttamat metsävauriot	44
4.7 Viljelykasvivauriot	45
4.8 Ilmastomuutos	48
4.9 Työkoneiden haitat	49
4.10 Sähkön hankinnan haitat	49
4.11 Polttoaineketjujen alkupään haitat	49
4.12 Ulkomaille kulkeutuvien päästöjen haitat	50
4.13 Yhteenveto tieliikenteen haitoista	51
4.14 Tieliikenteen aiheuttaman haitan kohdistaminen suoritteille	52
5. TULOSTEN LUOTETTAVUUDEN ARVIOINTIA	55
5.1 Epävarmuustekijät	55
5.2 Herkkyystarkastelu	58
5.2.1 Kuolleisuusriski	58
5.2.2 Sairastuvuusriski	59
5.2.3 Rakennusmateriaalien rapautuminen	60
5.2.4 Likaantuminen	61
5.2.5 Happamoittavan laskeuman aiheuttamat metsävauriot	62
5.2.6 Otsonin aiheuttamat metsävauriot	63
5.2.7 Viljelykasvivauriot	63
5.2.8 Ilmastomuutos	64
5.2.9 Työkoneiden päästöt	65

5.2.10 Sähkön hankinta.....	66
5.2.11 Polttoaineketjut	66
5.2.12 Päästöjen haitat ulkomailla	66
5.2.13 Haitan jako suoritteille.....	67
5.2.14 Yhteenveto herkkyystarkastelun tuloksista.....	67
6. VERTAILUA AIEMPIEN SELVITYSTEN TULOKSIIN	69
7. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	71
LÄHDELUETTELO	

Liite 1 ExternE Transport -tapaustarkasteluja

LYHENNELUETTELO

Kirjainlyhenteitä

BKT	Bruttokansantuote
CV / CVM	Subjekttiivisten arvostusten menetelmä (Contingent Valuation Method)
ECU	Euroopan Unionin valuuttayksikkö
EU	Euroopan unioni
Ghg	Kasvihuonekaasut (greenhouse gases)
GWP	Globaali lämmityspotentiaali (Global Warming Potential)
KELA	Kansaneläkelaitos
LIISA	Päästötietojärjestelmä, joka sisältää tieliikenteen päästö- ja energiankulutustiedot
LIPASTO	Päästötietojärjestelmä, joka sisältää kaikkien liikennemuotojen päästö- ja energiankulutustiedot
MOBILE	Liikenteen energiankäytön ja ympäristövaikutusten tutkimusohjelma
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
RAD	Rajoittuneen toimintakyvyn päivä (Restricted Activity Day)
RAILI	Päästötietojärjestelmä, joka sisältää rautatieliikenteen päästö- ja energiankulutustiedot
RHA	Hengitystieoireilusta johtuvat sairaalasisäännot (Respiratory Hospital Admissions)
SIHTI	Energia- ja ympäristötekniikan tutkimusohjelma
SWEEA	Swedish Economic and Environmental Accounts
UN ECE	YK:n Euroopan talouskomissio
YOLL	Menetetyt elinvuodet (Years of Life Lost)

Alkuaineet ja kemialliset yhdisteet

CO	Hiilimonoksidi eli häkä
CO ₂	Hiilidioksidi
HC	Hiilivedyt (sisältävät VOC:t)
NMVOC	Haihtuvat hiilivedyt lukuunottamatta metaania (Non-Methane Volatile Organic Compounds)
NO _x	Typen oksidit (NO _x = NO + NO ₂)
O ₃	Otsoni
PM _{2,5}	Pienhiukkaset, halkaisija alle 2,5 µm
PM ₁₀	Hengitettävät hiukkaset, halkaisija alle 10 µm
SO ₂	Rikkidioksidi
TSP	Kokonaisleijuma
VOC	Haihtuva orgaaninen yhdiste (Volatile Organic Compound)

Yksiköjä

a	vuosi
h	tunti
GWh	gigawattitunti, miljardi wattituntia
kg	kilogramma, tuhat grammaa
kWh	kilowattitunti, tuhat wattituntia
$\mu\text{g}/\text{m}^3$	mikrogrammaa (gramman miljoonasosaa) kuutiometrissä
μm	mikrometri, metrin miljoonasosa
mg/m^3	milligrammaa (gramman tuhannesosaa) kuutiometrissä
MJ	megajoule, miljoona joulea
m^2	neliometri
m^3	kuutiometri
ppb	miljardisosa (parts per billion)
ppb-h	kynnysarvon ylittävän otsonialtistuksen yksikkö (ppb-tunteja)
t	tonni
TWh	terawattitunti, 10^{12} wattituntia

KÄSITELUETTELO

Ajoneuvokilometri	Liikennesuoritetta kuvaava suure. Yksi ajoneuvokilometri muodostuu yhden ajoneuvon matkustaessa yhden kilometrin pituisen matkan.
"Akuutti kuolleisuus"	Ilman epäpuhtauksien aiheuttama äkillinen kuolemantapaus.
Altistus-vaikutusfunktio	Funktio, joka yhdistää ilman epäpuhtauspitoisuuden muutoksen ympäristöhyödykkeen laadussa tai määrässä tapahtuvaan muutokseen
Arvo	Asian kokonaismerkitys. Jos arvoa mitataan rahassa saadaan <i>hinta</i> . Arvoja on ryhmitelty erilaisiin luokkiin: käyttöarvo, optioarvo, itseisarvo. Englanniksi: <i>Value</i> .
Arvottaminen	Menettely, jossa erimittaisille asioille tai vaikutuksille annetaan yhteismitallinen, yleensä rahallinen <i>arvo</i> .
Contingent Valuation -menetelmä (CV-menetelmä)	Haastatteluihin perustuva taloudellinen arviointimenetelmä, jossa ihmisiltä kysytään kuinka paljon he olisivat valmiita maksamaan (<i>maksuhalukkuus</i>) tai kuinka paljon heille pitäisi maksaa (<i>hyväksymishalukkuus</i>) tarkastellusta asiasta. Yleensä toteutuksessa on käytetty lähes poikkeuksetta maksuhalukkuutta. Englanniksi: <i>Contingent Valuation/CV Method</i> .
Dieselhiukkaset	Dieselhiukkaset ovat suoraan dieselmoottorista peräisin olevia pienhiukkasia.
Diskonnttaaminen	Toimenpide, jolla eriaikaiset <i>hyödyt</i> ja kustannukset saadaan vertailukelpoisiksi esimerkiksi investointivaihtoehtojen vertailussa. Käytännössä tämä tehdään <i>laskentakoron</i> avulla ja investoinneille lasketaan useimmiten <i>nykyarvo</i> . Mitä korkeampi korko on, sitä tärkeämpiä lähellä nykyhetkeä toteutuvat <i>hyödyt</i> ja kustannukset ovat verrattuna tulevaisuudessa tapahtuviin. Englanniksi: <i>Discounting</i> .
Elinkaari	Tuotteen vaiheet siihen käytettyjen raaka-aineiden hankinnasta ja tuottamisesta tuotteesta syntyvien jätteiden loppukäsittelyyn. Englanniksi: <i>Life Cycle LC</i> .
Funktio	Matemaattisesti ilmaistu suhde, jossa toisistaan riippumattomien muuttujien avulla voidaan ratkaista niistä riippuvan muuttujan arvo. Esimerkiksi ajomatkan kesto riippuu yksinkertaistaen matkan pituudesta ja ajoneuvon nopeudesta.
Hengitettävät hiukkaset	Hiukkaset, joiden halkaisija on alle 10 µm (PM ₁₀).
Hinta	<i>Hyödykkeen</i> hinta osoittaa, mistä sen saamiseksi on luovuttava. <i>Markkinahyödykkeiden</i> hinta voidaan antaa rahassa.

Hiukkaspäästöt	Ilmaan esimerkiksi polton seurauksena joutuvia tai muodostuvia erilaatuisia ja -kokoisia hiukkasia. Ihmiselle haitallisimpia ovat pienhiukkaset, joiden läpimitta on pienempi kuin $2,5\text{ }\mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2,5}$). Myös $10\text{ }\mu\text{m}$ pienemmät hiukkaset aiheuttavat terveysriskejä (PM_{10}). Suuremman kokoluokan hiukkaset aiheuttavat kustannuksia myös likaantumisen kautta.
Hyöty	Termi, joka yhdistetään usein hyvinvointiin. Henkilön voidaan kuitenkin katsoa saavan hyötyä muutoksesta, jos hän mieluummin näkee muutoksen toteutuvan kuin alkuperäisen tilanteen vallitsevan.
Ilmastonmuutos	Sääolojen yleisen luonteen muuttuminen pitkällä aikavälillä.
Kasvihuonekaasut	Kaasut, jotka aiheuttavat maapallon ilmastonmuutoksen. Tärkein on hiilidioksidi (CO_2). Muita merkittäviä kaasuja ovat metaani (CH_4), typpioksiduuli (N_2O) ja CFC-kaasut.
Kaukokulkeutuminen	Epäpuhtauksien leviäminen päästölähteestä useiden satojen kilometrien etäisyyteen.
"Krooninen kuolleisuus"	Pitkäaikaisesta (vuosien kuluessa tapahtuvasta) ilman epäpuhtauksille altistumisesta johtuva eliniän lyheneminen.
Laskentakorko	Korkokanta, joka ilmaisee ajan merkityksen <i>hyötyjen</i> ja kustannusten <i>arvolle</i> . Jos laskentakorko on 10 %, ovat vuoden kuluttua saatava 110 mk ja kahden vuoden kuluttua saatava 121 mk samanarvoisia kuin heti saatava 100 mk. Kutsutaan myös diskonttoroksi. Englanniksi: <i>Discount rate / Interest rate</i> .
Maksuhalukkuus	Maksimisumma rahaa, jonka yksilö on valmis maksamaan tietystä parannuksesta ympäristön tilassa. Maksuhalukkuus mittaa sekä <i>käyttöarvoja</i> että muita <i>arvoja</i> (<i>olemassaoloarvo</i> , <i>lahjoitusarvo</i> , <i>optioarvo</i>). Englanniksi: <i>Willingness to Pay (WTP)</i> .
Markkinahinta	<i>Hinta</i> , jolla <i>hyödykkeen</i> kysyntä ja tarjonta ovat yhtä suuria.
Nykyarvo	Summa, joka saadaan eriaikaisten <i>hyötyjen</i> ja kustannusten <i>diskonttauksen</i> jälkeen ja joka ilmaisee kyseisten hyötyjen ja kustannusten arvon tarkasteluhetkellä. Nykyarvo ei ota huomioon hyötyjen ja kustannusten toteutumisen riskejä.
Pienhiukkaset	Hiukkaset, joiden halkaisija on alle $2,5\text{ }\mu\text{m}$.
Polttoaineketju	Polttoaineiden jalostamiseen ja käyttöön liittyvistä osaprosesseista ja toiminnoista muodostuva ketju, joka yleensä alkaa luonnonvarojen hankinnasta ja päättyy jätteiden käsittelyyn.
Rajoittuneen toimintakyvyn päivä (RAD)	Päivä, jolloin toimintakyky on sairauden vuoksi selvästi rajoittunut ja sairaus vaatii vuodelepoa, mutta ei sairaalahoitoa. Englanniksi: <i>Restricted activity day</i> .
Resuspensio	Liikenteen ja tuulen maasta nostattama katupöly yms. Kutsutaan myös re-emissioksi.
Sairauskustannukset	Sairauden hoidon kustannukset sekä sairauden aiheuttaman yksilön tuottavuuden menetyksen kustannukset. Englanniksi: <i>Cost of Illness, COI</i> .

Tilastollinen elämän arvo	Ihmisten keskimääräisestä <i>maksuhalukkuudesta</i> kuolemanriskin vähentämiseksi johdettu arvio ihmiselämän keskimääräisestä <i>arvosta</i> . Englanniksi: <i>Value of Statistical Life</i> .
Top-down-lähestymistapa	Tarkastelutapa, jossa siirrytään kokonaisvaltaisemmasta tarkastelusta kohti spesifisiä, yksityiskohtaisempia arvioita.
Ulkoinen vaikutus	<i>Hyödykkeen</i> tuottamisesta tai kuluttamisesta syntyneet vaikutukset, jotka eivät näy kustannuksissa tai hinnoissa ja vaikuttavat taserajan ulkopuolelle "kolmansiin osapuoliin". Esimerkkejä ovat ilman epäpuhtauksien aiheuttamat sairaudet tai mehiläisfarmin naapurissa asuvien viljelijöiden saamat hyödyt.
Ulkoinen kustannus/hyöty	<i>Ulkoisesta vaikutuksesta</i> aiheutunut taloudellinen kustannus/hyöty. Englanniksi: <i>External Cost/Benefit, Externality</i> .
Vaikutuspolkumenetelmä	Euroopan komission rahoittamassa ExternE-tutkimuskokonaisuudessa kehitetty nelivaiheinen (päästöt, pitoukset, vaikutukset, kustannukset) ympäristövaikutusten ja -kustannusten arviointimenetelmä. Englanniksi: <i>Impact Pathway Method</i>
Ympäristöhyödyke	Ympäristöön liittyvä, yleensä ilmainen, markkinamekanismin ulkopuolella oleva tavara (esimerkiksi puhdas ilma) tai palvelu (esimerkiksi virkistys).
Ympäristöhaitta	Negatiivinen <i>ympäristövaikutus</i> . Käytetään sekä määrällisen että rahallisen arvon muutoksesta.
Ympäristökustannus	Tässä selvityksessä termiä on käytetty kuvaamaan <i>ympäristöhaittoista</i> aiheutuvaa menetystä rahassa arvotettuna. Ympäristökustannus voi olla ulkoinen tai se voi olla eri tavoin sisäistetty. Ympäristökustannusten laskemiseen on kehitetty erilaisia menetelmiä joiden kattavuus ja luotettavuus vaihtelevat. Muissa yhteyksissä ympäristökustannuksilla tarkoitetaan myös ympäristönsuojelutoimenpiteistä (sisäinen kustannus) aiheutuvaa rahallista menetystä.
Ympäristöhyöty	Positiivinen <i>ympäristövaikutus</i> . Käytetään sekä määrällisen että rahallisen arvon muutoksesta.
Ympäristötalous	Taloustieteen osa, jossa tutkitaan luonnonvarojen käyttöön ja ympäristövaikutuksiin liittyviä taloudellisia ilmiöitä.
Ympäristövaikutus	<i>Ympäristöhyödykkeen</i> laadussa tai määrässä tapahtunut muutos jonkin hankkeen seurauksena. Ympäristövaikutukset kuvataan yleisesti vaikutuksina ihmisten terveyteen, ihmisten hyvinvointiin, luontoon ja koko maailmaan. Ne voivat olla fyysisiä, sosioekonomisia tai psykologisia; ne voidaan jakaa lyhyt- tai pitkäkestoisiin vaikutuksiin, ja ne voivat olla taloudellisesta näkökulmasta sisäisiä tai ulkoisia.

1. JOHDANTO

1.1 Tutkimuksen tausta ja tavoitteet

Projektin tavoitteena on määrittää, mitata ja arvottaa tieliikenteen polttoaineperäisten päästöjen aiheuttamat ympäristökustannukset. Tarkastelukohteena on Suomen tieliikenne sekä tieinfrastruktuuriin kuuluvien sähkölaitteiden energiankulutus.

Selvityksiä Suomen tieliikenteen päästöjen ympäristökustannuksista on tehty kolme:

- Tieliikenteen päästöjen haittojen kustannukset. Tiehallituksen sisäisiä julkaisuja 3/1992. Tielaitoksen toimeksiannosta Ekono 1992.
- Tieliikenteen polttoaineperäisten päästöjen vaikutusten arvottaminen. MOBILE-tutkimusohjelma. Energia-Ekono Oy 1994.
- Tieliikenteen päästöjen vaikutusten arvottaminen. Tielaitoksen selvityksiä 9/1997. Tielaitoksen toimeksiannosta Energia-Ekono Oy 1997.

Liikenteen ympäristövaikutusten arvottamisen kansainvälinen tutkimus on ollut viime vuosina hyvin vilkasta. Tämän vuoksi vuoden 1997 alkupuolella julkaistut yksikkökustannukset, jotka perustuivat vuonna 1996 käytettävissä olleeseen tietoon, on aiheellista päivittää. Ratahallintokeskus julkaisee vuoden 1999 alussa rautatieliikenteelle laaditut haitta-arviot (Energia-Ekono 1998c), jotka on laadittu uusimpaan tietämykseen perustuen. Täten tieliikenteen haitta-arviot on aiheellista päivittää myös vertailukelpoisuuden vuoksi.

Aiempiin selvityksiin nähden merkittävimmät erot tässä selvityksessä ovat:

- Terveysvaikutusten arvioinnissa on ollut käytettävissä uusia altistusvaikutusfunktioita. Tämä mahdollistaa kattavamman arvion haitoista. Käytetyt altistusvaikutusfunktiot on yhtenäisyyden ja kansainvälisen vertailtavuuden vuoksi otettu käyttöön yhdestä lähdetutkimuksesta, kun aiemmin käytettiin eri selvityksissä identifioituja altistusvaikutusfunktioita.
- Likaantumisen haitta-arvio perustuu eri lähdetutkimukseen kuin aiempi arvio.
- Ilmastonmuutoksen vaikutusten kustannusten arvottamisessa on käytetty hieman aiemmasta poikkeavaa arviota hiilidioksiditonin yksikkökustannuksena. Ero ei kuitenkaan ole kovin suuri ja arviointi perustuu haittojen arviointiin (eikä esimerkiksi haittojen välttämisen kustannuksiin) kuten aiemmassa selvityksessä.
- Sairastuvuusriskin arvottamisessa on käytetty ensisijaisesti kotimaisia yksikkökustannuksia ja niiden puuttuessa kansainvälisistä selvityksistä johdettuja yksikkökustannuksia. Aiemmissa selvityksissä ei ollut käytettävissä sairastuvuudelle kotimaisia yksikkökustannuksia, mutta kokonaisvaikutus tuloksiin on pieni.

- Infrastruktuurin tarvitseman sähkön hankinnan haittojen arvottaminen on lisätty haitta-arvioon. Samoin on menetelty työkoneiden polttoaineiden käytön osalta. Näitä ei ole arvioitu aiemmissa selvityksissä.
- Tarkastelukohteena on vuoden 1996 päästöt kun aiemmissa selvityksissä tarkasteltiin vuoden 1990 päästöjä.
- Raportointi on suoritettu vuoden 1997 rahassa kun aiemmissa selvityksissä raportointi suoritettiin vuoden 1990 rahassa.
- Haitat on kohdistettu kaikkien merkittävimpien Suomessa käytössä olevien erityyppisten ajoneuvojen suoritteille. Aiemmissa selvityksissä suoritetehtävät haitat raportoitiin vain muutamille ajoneuvotyypeille.

Viimeisen vuoden aikana on valmistunut ja on ollut valmisteilla useita tutkimuksia liikenteen päästöjen ympäristökustannuksista. Käytetyin menetelmä on ollut vaikutuspolkumenetelmä (impact pathway method), jota on kehitetty Euroopan Unionin rahoittaman ExternE-projektin eri vaiheissa. Viimeisimpiä tutkimuksia liikenteen päästöjen ympäristökustannuksista ovat:

- Euroopan komissio (1997a): External Costs of Transport in ExternE. JOULE III Programme.
- Euroopan komissio (1998): Quality Indicators for Transport Systems (QUITS). TRANSPORT Programme.
- Euroopan komissio (Valmistuu 1999): Pricing European Transport Systems (PETS). TRANSPORT Programme. Käsikirjoitus
- Euroopan komissio (Valmistuu 1999): Methodological Framework to evaluate Real Transport Costs (FISCUS Work Package 2). TRANSPORT Programme. Käsikirjoitus.
- Euroopan komissio (projekti alkanut 1998): ExternE Core Transport

Koska ympäristökustannukset ovat hyvin tapauskohtaisia ja riippuvaisia liikennemuodon lisäksi ajasta ja paikasta ei näissä projekteissa muodostettuja arvioita ole tarkoitukseenmukaista siirtää suoraan Suomen olosuhteisiin. Sen sijaan yllä mainituissa tutkimuksissa esitetyt tutkimusmenetelmät ja osin myös lähtötiedot ovat käyttökelpoisia arvioitaessa Suomen tieliikenteen polttoaineperäisten päästöjen aiheuttamia ympäristökustannuksia.

1.2 Tutkimusmenetelmät

Ilmaan kohdistuvien päästöjen ympäristökustannusten taloudellinen määrittäminen suoritetaan vaikutuspolkumenetelmällä (Impact Pathway Method). Valittua menetelmää voidaan soveltaa niiden hyvin erilaisten vaikutusten vertailuun, joita liikenteen päästöillä on. Tämä menetelmä tuottaa tietoa muodossa, joka on helposti eri sidosryhmien ymmärrettävissä. Lisäksi tällä arviointimenetelmällä ympäristövaikutusten kustannuksia on mahdollista vertailla ympäristönsuojelutoimenpiteiden kustannuksiin. Haittojen ra-

hallinen arvioiminen parantaa edellytyksiä tehdä taloudellisesti optimaalisia päätöksiä esimerkiksi päästöjen vähentämistoimenpiteistä.

Seuraavassa kaaviossa esitetään vaikutuspolkumenetelmän kulku. Sen jälkeen kuvataan yksityiskohtaisemmin sekä menetelmän vaiheita että projektin kulkua.



Kuva 1.1 Vaikutuspolkumenetelmän työvaiheet

Vaihe 1. Päästöarviot

Tässä selvityksessä tarkastellaan tieliikenteen päästöjä ilmaan vuonna 1996. Päästöt otetaan LIISA 96-laskentajärjestelmästä. Polttoaineiden käytön lisäksi tarkastellaan polttoaineketjujen alkupään vaiheita eli tuotantoa, kuljetuksia, jalostusta ja jakelua, jotka edeltävät käyttövaihetta. Lisäksi tarkastelussa on mukana työkoneiden polttoaineiden käyttö.

Tutkimuksen kohteena ovat päästöt ilmaan. Tarkasteltavia päästökomponentteja ovat rikkidioksidi (SO_2), typen oksidit (NO_x), hiukkaset (TSP, PM_{10} ja $\text{PM}_{2.5}$ mukaanluettuna sekä suorat hiukkaspäästöt että ilmakehässä muodostuva sulfaatti ja nitraatti), hiilimonoksidi (CO), hiilivedyt (HC), päästöistä muodostuva otsoni (O_3) ja kasvihuonekaasut (CO_2 , CH_4 ja N_2O). Eri päästöjen vaikutuksia tarkastellaan vaihtelevalla tarkkuudella, sillä joidenkin päästökomponenttien pitoisuuksista tai vaikutuksista on saatavilla paremmin tietoa kuin toisista.

Vaihe 2. Pitoisuustarkastelut

Tässä vaiheessa arvioidaan tieliikenteen pakokaasupäästöjen vaikutus ulkoilman epäpuhtauspitoisuuksiin. Tarkastelu suoritetaan erikseen Suomen taajamille ja haja-asutusalueille.

Koska tämän työn puitteissa ei ole ollut mahdollista tehdä leviämismallilaskelmia, arvioidaan pitoisuus sen sijaan ns. top-down-periaatteella. Käytettävissä on kuitenkin huomattava määrä pitoisuusmittauksia sekä leviämismallilaskelmia, joiden avulla liikenteen aiheuttamia pitoisuuksia ja niiden osuutta kokonaispitoisuuksista voidaan arvioida. Pitoisuusarviot lähtevät alkavat kunkin epäpuhtauskomponentin vallitsevista kokonaispitoisuuksista. Kokonaispitoisuuksista vähennetään ensin pääosin Suomen rajojen ulkopuolelta tuleva kaukokulkeuma (tausta). Jäljelle jäävä pitoisuus kohdistetaan eri sektoreille (liikennesektori, energiantuotanto jne.) kyseisen sektorin aiheuttamat pitoisuudet huomioiden tai vaihtoehtoisesti päästömäärien suhteessa Suomen kokonaispäästöihin. Osa Suomen tieliikenteen päästöistä kulkeutuu Suomen rajojen ulkopuolelle. Myös näiden päästöjen määrää on arvioitu.

Vaihe 3. Ympäristövaikutusten kvantifiointi

Seuraavaksi arvioidaan pitoisuuksien vaikutukset ihmisiin (eri tyyppinen oireilu ja eliniän lyheneminen) ja rakennettuun ympäristöön (rakennusmateriaalien korrosio ja likaantuminen) taajamissa. Haja-asutusalueilla arvioidaan terveys- ja materiaali-vaikutusten lisäksi luontovaikutuksia (sato- ja metsävauriot). Lisäksi arvioidaan kasvihuonekaasupäästöjen aiheuttaman ilmastomuutoksen haittoja.

Kaikkia ilmaan kohdistuvien päästöjen vaikutuksia ei ole voitu arvioida johtuen siitä, ettei käytettävissä ole riittävän luotettavia altistus-vaikutusfunktioita tai contingent valuation -menetelmällä tehtyjä referenssitutkimuksia. Kokonaan arvottamatta jääneitä vaikutuksia ovat esimerkiksi vaikutukset vesistöihin ja maaperään, luonnon virkistysarvo, kulttuurihistorialliset arvot ja biodiversiteetti. Melko vakava puute on se, että NO_x -päästöjen suorille terveysvaikutuksille ei ole käytettävissä riittävän luotettavia altistus-vaikutusfunktioita. Tarkastelun ulkopuolella ovat tieliikenteen muut ympäristöhaitat, kuten melu ja haju, tilantarve, ajantarve, vaikutukset maisemaan, onnettomuudet ja ajoneuvojen elinkaaritarkastelut.

Pitoisuuksien ja vaikutusten välissä käsitellään nykyään yhä useimmin altistusta, ja alan tutkimus on vilkastunut viime vuosina huomattavasti. Altistuskäsitteen poisjättäminen voidaan tässä yhteydessä perustella sillä, että pääosa vaikutustutkimuksista perustuu mitattuihin pitoisuuksiin - ei altistuksiin - jolloin altistus on keskimäärin huomioitu pitoisuuden ja vaikutuksen välisessä suhteessa eli altistus-vaikutusfunktioissa.

Vaikutusten arviointi suoritetaan pääsääntöisesti EU:n rahoittamassa ExternE-projektissa suositeltujen altistus-vaikutusfunktioiden avulla (Euroopan komissio 1997a). Altistus-vaikutusfunktio kullekin erilaiselle vaikutukselle on useimmiten muotoa:

muutos hyödykkeessä = korrelaatio • pitoisuus • altistuvan hyödykkeen/kohteen määrä

Tällöin esimerkiksi pienhiukkasten aiheuttama aikuisten astmaatikkojen lisääntynyt yskä arvioidaan seuraavasti:

yskäpäivien määrä = korrelaatio • $\text{PM}_{2.5}$ -pitoisuus • aikuisastmaatikkojen osuus väestöstä • väestö

Vaihe 4. Ympäristövaikutusten taloudellisen arvon määrittäminen

Arvioitaessa päästöjen haittavaikutusten taloudellista arvoa tavoitteena on muodostaa kansantaloudellinen kokonaisarvo. Tätä voidaan osittain mitata maksuhalukkuutta ilmaisevilla markkinahinnoilla ja osittain esimerkiksi contingent valuation -tutkimuksissa (CV) muodostettujen maksuhalukkuusarvioiden perusteella. Tässä selvityksessä käytetään markkinahintoja arvioitaessa materiaalien korroosion (huolto- ja vaihtokustannukset), metsävaurioiden (kantohinnat) ja satotappioiden (maataloustuotteiden maailmanmarkkinahinnat) kustannuksia arvioitaessa. Terveysvaikutusten, likaantumishaittojen sekä ilmastonmuutoksen kohdalla käytetään haittojen yksikköarvona CV-tutkimuksissa laadittuja yksikköarvoja, markkinahintojen tai näiden yhdistelmiä.

Arviota Suomessa syntyvien ympäristökustannusten yksikköhaittoista ($\text{mk/kg}_{\text{päästö}}$) haja-asutusalueilla käytetään hyväksi arvioitaessa polttoaineketjujen alkupään eli käyttöä edeltävien vaiheiden ympäristökustannuksia. Samoin menetellään tarkasteltaessa Suomen ulkopuolelle kulkeutuvien tieliikenteen päästöjen vaikutusten kustannuksia.

Infrastruktuurin sähkönhankinnan haitta-arvio sekä polttoaineiden käytön että polttoaineketjujen alkupään osalta otetaan lähdetutkimuksesta (Energia-Ekono 1998c) muodossa p/kWh. Tämän vuoksi sähkönhankinnan aiheuttamia päästöjä, pitoisuuksia ja vaikutuksia ei tässä työssä tarkastella erikseen.

Haitta-arviot kohdistetaan eri ajoneuvotyyppien suoritteille. Tarkasteltavat ajoneuvotyyppit ovat bensiini- ja dieselkäyttöiset henkilöautot, bensiini- ja dieselkäyttöiset pakettiautot, linja-autot sekä irtoperävaunulliset ja perävaunuttomat kuorma-autot. Bensiinikäyttöisten ajoneuvojen osalta tarkastellaan erikseen katalysaattorilla varustettuja ajoneuvoja ja ajoneuvoja, joissa katalysaattoria ei ole. Lisäksi tarkastelussa on mukana työkoneiden polttoaineiden käytön vaikutus.

Kaikki ympäristökustannukset esitetään vuoden 1997 rahassa.

1.3 Tulosten luotettavuus

Saatuihin arvioihin ympäristökustannuksista liittyy merkittävää epävarmuutta. Epävarmuudet liittyvät päästö- ja pitoisuusarvioihin, altistus-vaikutusfunktioihin, yksikkökustannuksiin ja laskentakorkoon. Luotettavia funktioita ei myöskään ole toistaiseksi läheskään kaikille altistus-vaikutusyhteyksille - esimerkiksi typpidioksidin terveysvaikutuksille ja happamoittavan laskeuman metsävaikutuksille. Erityisen merkittävä epävarmuuden lähde on ilmastonmuutoksen arvottaminen. Tässä selvityksessä arviot tieliikenteen päästöistä johtuvan ilmastonmuutoksen aiheuttamista kustannuksista perustuvat ExternE:ssä (Euroopan komissio 1997a ja 1997b) suositellun FUND-tietokonemallin (Institute for Environmental Studies, Amsterdam) tuottamiin tuloksiin. Alan tutkimuksen edetessä saattavat nykyiset arviot CO₂-päästöjen yksikköarvosta muuttua merkittävästikin.

2. TIELIIKENTEEN PÄÄSTÖT

2.1 Suomen liikenteen päästöt

LIPASTO 96 on Suomessa kehitetty kaikkien liikennemuotojen pakokaasupäästöjen ja energiankulutuksen laskentajärjestelmä. Järjestelmän avulla laskettiin Suomen liikenteen hiilimonoksidi-, hiilivety-, typen oksidi-, hiukkas-, rikkidioksidi- ja hiilidioksidi-päästöt vuonna 1996. LIISA 96 on LIPASTO-järjestelmän alamalli, joka on kehitetty tieliikenteen päästöjen laskentaan. (Mäkelä ym. 1997).

Taulukko 2-1 Suomen liikenteen päästöt ja energiankulutus 1996 (ilmaliikenteen hiukkaspäästöt puuttuvat)

	Rikki- dioksidi t/a	Typen oksidit t/a	Hiukkaset t/a	Hiili- monoksidi t/a	Hiilivedyt t/a	Hiili- dioksidi 1000 t/a	Energian- kulutus TJ/a
Tieliikenne	1 175	127 037	7 557	295 514	49 012	10 301	141 061
Rautatieliikenne	266	3 586	93	523	476	291	3 744
Vesiliikenne	19 619	62 513	1 702	14 214	5 145	2 534	34 936
Ilmaliikenne	271	2 495		2 774	317	728	9 789
Yhteensä	21 332	195 630	9 351	313 025	54 949	13 854	189 530
Tieliikenteen osuus	5,5 %	64,9 %	80,8 %	94,4 %	89,2 %	74,4 %	74,4 %

2.2 Tieliikenteen suoritteet ja päästöt

LIISA 96 sisältää eri ajoneuvotyyppien suoritteet ja päästöt pääkaduilla, kokoojaka-
duilla, tonttikaduilla, rakennuskaavateillä, taajamien pääteillä, taajamien muilla teillä,
maaseudun pääteillä sekä maaseudun muilla teillä. Tulokset on yleistetty taajamille ja
haja-asutusalueille. Taajamien suoritteet ja päästöt on arvioitu laskemalla yhteen kai-
killa muilla teillä paitsi maaseudun teillä syntyvät suoritteet ja päästöt. Haja-
asutusalueiden suoritteet ja päästöt on arvioitu maaseudun pääteillä ja muilla teillä syn-
tyvien suoritteiden ja päästöjen summaksi.

Vuonna 1996 polttonesteitä käytettiin yhteensä noin 3,3 milj. tonnia. Tätä vastaava
energian käyttö oli 141 milj. GJ. Seuraavassa taulukossa 2-2 on esitetty vuoden 1996
keskimääräistä ajoneuvokantaa vastaavat keskimääräiset päästökertoimet. Luvut on
saatu siten, että LIISA 96:n laskemat kokonaispäästömäärät on jaettu suoritteiden mää-
rällä. Luvut sisältävät koko kaluston keskimääräiset päästökertoimet sekä kylmäkän-
nistyksistä että joutokäynnistä aiheutuvan lisäpäästön. Kertomalla nämä luvut suorit-
teella saadaan valtakunnan tasolla sama päästötulos kuin LIISA 96:lla ottaen huomioon
pyörityksestä aiheutuvat epätarkkuudet. Tuloksen epävarmuus kasvaa käytettäessä ko-
ko maata pienempiä alueita. Vuoden 1995 osalta vastaavat päästökertoimet on rapor-
toitu julkaisussa *Suomen tieliikenteen pakokaasupäästöt, Liisa 95 -laskentajärjestelmä*
(Mäkelä ym. 1996, liite 18).

On aiheellista huomata, että lasketut keskimääräiset päästökertoimet ovat voimakkaita yleistyksiä ajoneuvotyypeittäin. Eri ikäisten ja erityisesti kuorma-autojen kohdalla eri painoisten ajoneuvojen päästökertoimet poikkeavat huomattavasti toisistaan.

Taulukko 2-2 LIISA 96:n tietojen avulla lasketut keskimääräiset päästökertoimet, g/km. (Luvut sisältävät koko kaluston keskimääräiset päästökertoimet sekä kylmäkäynnistyksistä että joutokäynnistä aiheutuvan lisäpäästön.)

Ajoneuvo	SO ₂	NO _x	Hiukkaset	CO	HC	CH ₄	N ₂ O	CO ₂
- g/km -								
Taajamat, kadut								
Henkilöautot, ei katal.	0,011	2,7	0,037	15	2,1	0,099	0,0063	192
Henkilöautot, katal.	0,010	0,49	0,0077	5,4	0,67	0,042	0,052	176
Henkilöautot, diesel	0,033	1,3	0,45	1,1	0,40	0,0074	0,014	182
Pakettiautot, ei katal.	0,017	4,8	0,048	26	3,3	0,11	0,0076	288
Pakettiautot, katal.	0,016	0,78	0,0086	7,0	0,72	0,059	0,064	264
Pakettiautot, diesel	0,052	1,8	0,22	1,2	0,45	0,0076	0,019	289
Linja-autot	0,17	14	1,4	9,1	3,6	0,18	0,047	953
Kuorma-autot, ei peräv.	0,15	9,9	1,1	6,4	2,2	0,13	0,031	824
Kuorma-autot, perävaunu	0,19	13,1	1,5	8,1	2,7	0,19	0,042	1 064
Haja-asutusalueet, maantiet								
Henkilöautot, ei katal.	0,010	3,5	0,043	6,7	1,2	0,048	0,0063	169
Henkilöautot, katal.	0,0091	0,46	0,010	1,6	0,14	0,026	0,052	154
Henkilöautot, diesel	0,026	0,81	0,29	0,60	0,12	0,0074	0,018	143
Pakettiautot, ei katal.	0,015	5,4	0,052	16	1,6	0,060	0,0075	246
Pakettiautot, katal.	0,013	1,1	0,012	5,1	0,29	0,0038	0,056	225
Pakettiautot, diesel	0,047	1,4	0,20	0,72	0,21	0,0058	0,019	262
Linja-autot	0,12	11	1,0	2,3	1,4	0,14	0,047	656
Kuorma-autot, ei peräv.	0,11	9,9	0,82	1,7	0,91	0,12	0,042	614
Kuorma-autot, perävaunu	0,17	12	1,3	4,8	1,6	0,12	0,042	927

Polttoaineiden käytön jakautuminen ajoneuvotyypeittäin on esitetty taulukossa 2-3. Tieliikenteen suoritteet ajoneuvotyypeittäin taajamissa ja haja-asutusalueilla on esitetty taulukossa 2-4 ja polttoaineiden käyttöä vastaavat tieliikenteen päästöt taulukossa 2-5. (Mäkelä 1997)

1. ☐ 2. ☐ 3. ☐ 4. ☐ 5. ☐

1

100

1

1000

Taulukossa 2-6 on esitetty tieliikenteen päästöjen jakautuminen alueittain. Taajamien päästöt on arvioitu laskemalla yhteen kaikilla muilla teillä paitsi maaseudun teillä syntyvät päästöt. Haja-asutusalueiden päästöt on arvioitu maaseudun pääteillä ja muilla teillä syntyvien päästöjen summaksi.

Taulukko 2-6 Tieliikenteen päästöt 1996, tonnia vuodessa

Komponentti	Taajamat	Haja-asutusalueet - t/a -	Yhteensä
SO ₂	602	573	1 176
NO _x	443	70 109	127 037
PM _{2,5} ¹	3 786	3 771	7 557
CO	201 601	93 913	295 514
HC	38 008	17 004	49 012
CH ₄	1 541	953	2 494
N ₂ O	443	491	933
CO ₂	5 305 349	4 995 441	10 300 791

¹ Liikenteen kaikki hiukkaspäästöt ovat kooltaan alle 2,5 µm eli PM_{2,5}.

2.3 Työkoneet

Tielaitoksella oli vuonna 1996 käytössä erilaisia työkoneita seuraavan taulukon mukaisesti.

Taulukko 2-7 Työkoneiden polttoaineiden käyttö vuonna 1996

Kone	Lukumäärä	Polttoaine	Polttoaineen kulutus, milj. litraa
Raskas kuorma-auto	774	citydiesel	yhteensä 18,0
Kevyt kuorma-auto	220	citydiesel	
Pakettiauto	349	citydiesel	
Tiehöylät	414	kevyt polttoöljy	yhteensä 8,5
Traktorikalusto	216	kevyt polttoöljy	
Pyöräkuormaimet	216	kevyt polttoöljy	
Lautat		kevyt polttoöljy	8,0

Työkoneiden aiheuttamia päästöjä ei ole tässä erikseen arvioitu. Haittojen arvottaminen tapahtuu käyttämällä myöhemmin polttoaineen käytölle muodossa penniä/litra arvioitavia yksikkökustannuksia. Koska kevyt polttoöljy on ominaisuuksiltaan samanlaista kuin diesel, voidaan sille käyttää samoja yksikkökustannuksia.

2.4 Polttoaineketjujen päästöt

Polttoaineen käytön lisäksi päästöjä syntyy polttoaineketjun alkupään vaiheista, joita ovat polttoaineen tuotanto, kuljetukset, jalostus ja varastointi.

Suomessa käytettävistä liikennepolttoaineista suurin osa on Nesteen jalostamaa. Bensiinissä Nesteen markkinaosuus on 90 % ja dieselissä 75 %. Nesteelle raakaöljy tulee pääasiassa (80 %) Pohjanmereltä ja loput Venäjältä. Dieselä tuodaan Suomeen jonkin verran Venäjältä sekä myös EU:n alueelta. (Neste Oy 1998). Pohjanmeren osuudeksi bensiinin tuotannossa arvioidaan 80 % ja dieselissä 70 %; lopun oletetaan olevan peräisin Venäjältä.

Polttoaineketjujen alkupään päästöt arvioidaan pohjautuen SIHTI 2-selvitykseen *Polttoaineketjujen paikalliset ympäristövaikutukset* (Energia-Ekono ja Maa ja Vesi 1997). Polttoaineketjujen päästöt voidaan arvioida päästökomponenteittain kullekin vaiheelle kyseisen vaiheen ominaispäästön ja polttonesteiden lämpöarvon avulla. Bensiinin lämpöarvo on 43,05 MJ/kg ja dieselin lämpöarvo on 42,6 MJ/kg. Käytetyt ominaispäästökertoimet on koottu taulukkoon 2-8. Näiden avulla lasketut polttoaineketjujen päästöt on koottu taulukkoon 2-9.

Polttoaineketjujen ympäristökuormitukset eroavat öljylähteestä ja tuotantotavasta riippuen. Eroja on mm. Pohjanmereltä hankittavan ja länsimaissa jalostettavan tai Venäjältä tulevan polttoaineen välillä.

Öljyn tuotannossa (ml. öljyn etsintä) päästöjä aiheutuu poraus- ym. laitteistojen energiankulutuksesta sekä haihtuvista orgaanisista yhdisteistä. Tässä tarkasteltujen päästökomponenttien lisäksi öljynhankinnan ympäristökuormituksia aiheutuu mm. suurehkoista tuotantotoimintaan tarvittavasta maapinta-alan käytöstä sekä öljypäästöistä maaperään ja vesistöön.

Erityisesti venäläisessä tuotannossa vähäinen ympäristövaikutusten ja turvallisuuden huomioonottaminen vaadittavan infrastruktuurin rakentamisessa, tehottoman poraustekniikan käyttö, porausjätteiden ja jäteöljyn sekä muiden jätteiden puutteellinen käsittely sekä varastojen huono taso ovat lisänneet ympäristökuormituksia. Ongelmana on ollut myös öljyn ohella syntyvän maakaasun soihduttaminen, mistä aiheutuu kasvihuonekaasuja ja hiukkaspäästöjä, joskin nykyisin kaasua pyritään myös hyödyntämään. Öljyputkionnettomuuksista aiheutuu paikallisesti terveysriskejä väestölle sekä vahinkoa luonnonympäristölle.

Öljyn kuljetusvaiheeseen kuuluvat putkikuljetukset, lastaustoiminnot sekä öljytankkerikuljetukset. Venäjältä raskasta polttoöljyä kuljetetaan Suomeen myös rautateitse. Kuljetusten osuus koko tuotantoketjussa on vähäinen ja rautatiekuljetuksen osuuden vaikutusta Venäjältä tuotavan öljyn tapauksessa ei ole tässä erikseen otettu huomioon.

Taulukko 2-8 Liikennepolttoaineiden polttoaineketjujen alkupään eri vaiheiden ominaispäästöt, mg/MJ (Keiserås Bakkane 1994, Neste 1997, World Bank 1994, Frischknecht ym. 1994)

Komponentti	Tuotanto	Kuljetus	Jalostus	Jakelu	Yhteensä
- mg / MJ -					
Bensiini					
SO ₂	0,4	0,1	15	0,6	16,3
NO _x	11,6	2,4	10	10,4	34,1
PM _{2,5}	0,5	0,0	2,0	0,8	3,3
CO	3,3	0,3	3,9	0,1	7,6
Hiilivedyt (NMVOC)	21,5	7,7	40	1,5	70,2
CH ₄	11,5	0,8	0	0,0	12,3
N ₂ O	0,040	0,007	0	0,0	0,047
CO ₂	1 333,1	177,1	6 681	250,5	8 442
Diesel					
SO ₂	0,5	0,1	11,1	0,4	12,1
NO _x	13,4	2,4	6,7	7,2	29,7
PM _{2,5}	0,6	0,0	0,9	0,4	1,9
CO	4,0	0,3	3,3	0,1	7,7
Hiilivedyt (NMVOC)	32,2	7,8	2,1	0,1	42,2
CH ₄	16,8	0,77	0,21	0,0	17,8
N ₂ O	0,046	0,007	0,00	0,0	0,053
CO ₂	1 539,6	179	3 419,5	128,2	5 266

Taulukon 2-8 mukaisesti öljyn tuotantovaihe on merkittävin erityisesti hiilivety- ja metaanipäästöissä. Typpioksiduulipäästöjä aiheutui käytettävissä olevan tiedon perusteella ainoastaan tuotanto- ja kuljetusvaiheissa. Suurin osa öljyn tuotantoketjun rikki- ja hiilidioksidipäästöistä syntyy jalostusvaiheessa. Polttoaineketjujen alkupään päästöt on esitetty taulukossa 2-9.

Taulukko 2-9 Polttoaineketjujen alkupään päästöt, tonnia vuodessa

	Bensiini	Diesel	Yhteensä
	- t/a -		
SO ₂	1 055	916	1 971
NO _x	2 204	2 248	4 452
PM _{2,5}	210	143	353
CO	492	582	1 074
Hiilivedyt (NMVOC)	4 544	3 195	7 739
CH ₄	793	1 346	2 139
N ₂ O	3,0	4,0	7,0
CO ₂	546 279	398 743	945 022

2.5 Päästöjen kulkeutuminen ulkomaille

Suomen rikkipäästöistä 68 % ja typpipäästöistä 81 % kulkeutuu ulkomaille vuoden 1995 päästötaseen mukaan (Tilastokeskus 1997b). Tällöin tieliikenteen rikkipäästöistä kulkeutui ulkomaille 800 tonnia ja typpipäästöistä 102 900 tonnia. Epäpuhtaudet kulkeutuvat ulkomaille mm. sulfaattina ja nitraattina. Päästöistä peräisin olevien pienimpien hiukkasten ($< 1 \mu\text{m}$) viipymä ilmakehässä on pitkä, jolloin ne kulkeutuvat tehokkaasti. Poikkeustapauksissa myös suuremmat hiukkaset voivat kulkeutua tuhansia kilometrejä (esim. Saharan hiekka). Hiukkasten kulkeutumisesta ei ole mallituloksia käytettävissä, joten tässä yhteydessä pienhiukkasten kulkeutuminen ulkomaille on suuntaantavasti arvioitu vastaavaksi kuin rikillä. Arvio hiukkaspäästöjen ulkomaille kulkeutuneesta osuudesta on siis 5 138 tonnia. Jatkossa arviota tulisi tarkentaa.

2.6 Sähkönhankinnan päästöt

Haitta-arvio käytetylle (p/kWh) sähkölle sekä sähkön hankinnan polttoaineketjuille on suoritettu tutkimuksessa *Suomen rautatieliikenteen polttoaineperäisten päästöjen aiheuttamat ympäristökustannukset* (Energia-Ekono 1998c). Tämä tutkimus puolestaan käytti lähdetutkimuksena selvitystä *Tuulivoiman ja aurinkosähkön kilpailukyky ympäristöhyödyt huomioon ottaen* (Energia-Ekono 1998a). Tehtyä haitta-arviota voidaan soveltaa suoran tieinfrastruktuurin sähkönhankinnan haittojen arvioimiseen, sillä tehty arvio perustuu Suomen keskimääräiseen sähkön hankintaan mukaanlukien oma tuotanto ja tuonti.

Tieliikenteen infrastruktuurin sähkönkäytöstä tarkastelussa on mukana tievalaistuksen sähkönkulutus. Sen on arvioitu olleen 100 GWh vuonna 1996. Arvioon sisältyy muuttaman prosenttiyksikön virhemahdollisuus. Tämän lisäksi on otettava huomioon siirtöhyöviden osuus 1,5 %, jolloin koko sähkönhankinnaksi voidaan arvioida 101,5 GWh. Tätä sähkönhankintaa vastaavat päästöt on arvioitu taulukossa 2-10. Jotta päästöarvio olisi yhdenmukainen rautatieliikenteelle tehtyjen arvioiden kanssa on tarkastelussa otettu sähkön tuotantovaiheen lähtökohdaksi IVO:n ympäristönsuojeluyksikössä laskeutunut Suomen sähköntuotannon ominaispäästöarvot, jotka on raportoitu RAILI:ssa (Mäkelä ym. 1998). RAILI:ssa on raportoitu muiden päästökomponenttien paitsi metaanin ja typpioksiduulin ominaispäästöt. Lisäksi on arvioitu sähkönhankinnan polttoaineketjujen alkupään päästöt, jotka sisältävät myös tuontisähkön päästöt. Myös polttoaineketjujen yhteenlasketut ominaispäästökertoimet on otettu rautatieliikenteelle tehdystä selvityksestä. Tässä selvityksessä ei arvioitu typpioksiduulin eikä muiden hiilivetyjen kuin metaanin polttoaineketjujen alkupään päästöjä, joten ne on jätetty pois myös tästä tarkastelusta, sillä niiden merkitys on kokonaispäästöjen kannalta vähäinen. (Energia-Ekono1998c)

Taulukko 2-10 Suomen sähköntuotannon ominaispäästöt (Mäkelä ym. 1998 ref. IVO 1997) ja infrastruktuurin sähkönhankinnan päästöt, tonnia vuodessa (haitta-arvio vastaa 101,5 GWh sähkönhankintaa)

Komponentti	Sähköntuotannon ominaispäästöt - g/kWh -	Päästöt sähkön- tuotannosta - t/a -	Pa-ketjujen alkupään ominaispäästöt - g/kWh -	Päästöt pa-ketjujen alkupäästä - t/a -
SO ₂	0,419	43	0,04	4,0
NO _x	0,478	49	0,11	11
PM _{2,5}	0,054	5,5	0,02	1,9
TSP			0,24	24
CO	0,13	13	0,13	13
Hiilivedyt	0,019	1,9	ei arvioitu	ei arvioitu
CH ₄	ei ilmoitettu	ei arvioitu	0,47	47
N ₂ O	ei ilmoitettu	ei arvioitu	ei arvioitu	ei arvioitu
CO ₂	274	27 811	27	2 729

2.7 Tieliikenteen päästöt yhteensä

Seuraavaan taulukkoon 2-11 on koottu tieliikenteen päästöt yhteensä. Taulukosta puuttuu työkoneiden päästöt. Valtaosa päästöistä syntyy polttoaineiden käyttövaiheessa. Infrastruktuurin sähkönkäytön osuus päästöistä on häviävän pieni.

Taulukko 2-11 Tieliikenteen päästöt yhteensä, tonnia vuodessa (työkoneiden päästöt eivät ole mukana)

Komponentti	Polttoaineketjujen alkupää		Polttoaineiden käyttö		Infran sähkö	Sähkön pa-ketjut	Yhteensä - t/a -
	Bensiini	Diesel	Bensiini	Diesel			
			- t/a -				
SO ₂	1 055	916	330	846	43	4,0	3 194
NO _x	2 204	2 248	73 034	54 003	49	11	131 549
PM _{2,5}	210	143	956	6 598	5,5	1,9	7 914
TSP						24	24
CO	492	582	269 061	26 453	13	13	296 614
Hiilivedyt	4 544	3 195	39 319	9 693	1,9	ei arvioitu	56 753
CH ₄	793	1 346	1 912	582	ei arvioitu	47	4 680
N ₂ O	3,0	4,0	651	282	ei arvioitu	ei arvioitu	940
CO ₂	546 279	398 743	5 569 059	4 731 732	27 811	2 729	11 276 353

2.8 Resuspensio

Resuspensiolla tarkoitetaan maasta ilmaan kohoavia hiukkasia. Resuspensiota (tai re-emissiota) aiheuttavat lähinnä liikenne. Myös erittäin voimakas tuuli kohottaa hiukkasia ilmaan. Resuspensio on Suomen taajamissa keskeisin hiukkasten massapitoisuuksiin

vaikuttava tekijä, ja ilmiötä pidetään merkittävänä ilmansuojeluongelmana. Keski-Euroopassa resuspensio on vähäistä eikä sitä juurikaan tarkastella hiukkasten yhteydessä.

Hiukkasille asetetut ilmanlaadun ohjearvot ylittyvät yleisesti taajamissa. Korkeita pitoisuuksia mitataan erityisesti keväisin, kun lumi sulaa ja tiet sekä maanpinta kuivuvat jolloin hiukkaset kohoavat helposti ilmaan.

Ilmiö aiheutuu pitkälti hiekoitushiekasta samoin kuin mm. asfalttia kuluttavien nastarenkaiden käytöstä. Usein puhutaankin katupölystä. Myös aiemmin ilmaan kohonnut materiaali, suorista päästöistä peräisin olevat hiukkaset ja kauempaa kulkeutuvat hiukkaset laskeutuvat maahan resuspendoituakseen uudelleen.

Muut keskeiset hiukkaspitoisuuksiin vaikuttavat tekijät ovat liikenteen, energiantuotannon ja teollisuuden suorat hiukkaspäästöt, kaasumaisista yhdisteistä ilmakehässä vähitellen muodostuvat hiukkaset, kaukokulkeuma sekä luontoperäiset hiukkaset.

Kokonaisleijumaa eli TSP-pitoisuuksia on mitattu säännöllisesti jo 1970-luvun loppupuolelta lähtien, ja pitoisuuksien tärkeimmäksi lähteeksi on selvityksissä osoitettu nimenomaan resuspensio. Esimerkiksi pääkaupunkiseudulla noin 90 % TSP-pitoisuuksista arvioitiin aiheutuvan resuspensiosta 1980-luvun loppupuolella (Laukkanen 1990).

Kooltaan pienempien, ns. hengitettävien eli PM_{10} -hiukkasten pitoisuuksia on seurattu Suomessa säännöllisesti 1980-luvun loppupuolelta lähtien. Selvitykset ovat osoittaneet, että resuspensiolla on keskeistä vaikutusta myös PM_{10} -pitoisuuksiin. Taajamien hengitettävistä hiukkasista aiheutuu suuruusluokaltaan noin 30 - 50 prosenttia resuspensiosta (esim. Hosiokangas 1995, Ojanen ym. 1998).

Hiukkasongelmaa on torjuttu jo vuosia mm. katujen puhtaanapitoa kehittämällä. Myös suoria päästöjä on vähennetty eri lähteistä. TSP-pitoisuuksia onkin saatu alennettua. Sen sijaan PM_{10} -pitoisuuksiin toimenpiteet eivät tunnu vaikuttavan yhtä tehokkaasti.

3. TIELIIKENTEEN AIHEUTTAMAT PITOISUUDET

Ympäristökustannusten arvioimisen keskeisiä lähtötietoja ovat tieliikenteen aiheuttamat pitoisuudet. Tässä työssä on arvioitu tieliikenteen aiheuttamat dieselhiukkas-, sulfaatti-, nitraatti, kokonaisleijuma eli TSP-, rikkidioksidi, hiilimonoksidi- ja otsonipitoisuudet.

Hiilimonoksidille on arvioitu suurin tuntipitoisuus, otsonille 6-tunnin keskiarvo ja muille vuosikeskiarvo. Päästökomponenttien ja aikajaksojen valinta perustuu käytettävissä oleviin altistus-vaikutusfunktioihin. Pitoisuudet on arvioitu erikseen taajamissa ja haja-asutusalueilla. Bentseeni-, bentso[a]pyreeni- ja 1,3-butadieenipitoisuuksille on käytettävissä altistus-vaikutusfunktiot, mutta näiden yhdisteiden pitoisuuksia ei ole arvioitu, koska päästöistä ja pitoisuuksista on melko vähän tietoja.

Tyypen oksidien pitoisuutta ei myöskään ole arvioitu tässä työssä, koska haittojen - esimerkiksi terveysvaikutusten - arviointiin tarvittavia ja riittävän luotettavia altistus-vaikutusfunktioita ei toistaiseksi ole käytettävissä.

Tieliikenteen aiheuttamat päästöt tunnetaan Suomessa hyvin. Suomessa tehtyjen pitoisuusmittausten, leviämislaskelmien ja muiden selvitysten perusteella on tässä työssä arvioitu kullekin tarkastellulle komponentille keskimääräinen kotimaisen tieliikenteen aiheuttama pitoisuus sekä taajamiin että haja-asutusalueille eri lähteitä hyödyntäen (Saari ym. 1996, Ilmatieteen laitos 1997 ja 1998, Pesonen ym. 1996, Aarnio ym. 1998, Ojanen ym. 1998, Karppinen ym. 1995, Hiltunen ym. 1993, Lindfors ym. 1995, Pietarila ym. 1997a, 1997b).

Tässä työssä käytetyt liikenteen aiheuttamat pitoisuudet ovat samat kuin Ratahallintokeskukselle laaditussa selvityksessä (Energia-Ekono Oy 1998c). Aiempaan tieliikenteen arvottamisselvitykseen verrattuna (Tielaitos 1997) rikkidioksidi- ja sulfaattipitoisuudet ovat tarkentuneet alaspäin. Liikenteen päästövähennysten seurauksena pitoisuudet ovat alentuneet. Arviot tarkentuvat myös uusien selvitysten myötä, jolloin eri lähteiden aiheuttamat pitoisuudet voidaan arvioida entistä tarkemmin. Kokonaisleijumapitoisuudet on arvioitu edellistä selvitystä suuremmiksi.

Pitoisuudet on arvioitu vuoden 1996 tasolla, ja päästötiedot pohjautuvat LIISA 96-laskentajärjestelmään (Mäkelä 1997). Pitoisuudet ovat laskeneet viime vuosina ja esimerkiksi vuonna 1998 vallitsevat pitoisuudet olisivat jonkin verran alhaisemmat kuin vuodelle 1996 arvioidut.

Seuraavaan taulukkoon 3-1 on koottu tieliikenteen päästötiedot ja pitoisuusarviot. Taulukon jälkeen on kuvaus siitä, miten pitoisuudet on kullekin päästökomponentille arvioitu. Kasvihuonekaasujen osalta ei arvioida pitoisuuksia, sillä niiden vaikutusten arvottaminen perustuu päästömääriin.

Taulukko 3-1 Taajamissa ja haja-asutusalueilla vallitsevat pitoisuudet ($\mu\text{g}/\text{m}^3$, CO: mg/m^3) sekä tieliikenteen aiheuttamat päästöt (t/a) ja pitoisuudet ($\mu\text{g}/\text{m}^3$, CO: mg/m^3) vuonna 1996. Pitoisuudet ovat vuosikeskiarvoja paitsi hiilimonoksidi on yhden tunnin maksimi ja otsoni kuuden tunnin keskiarvo.

	Vallitsevat pitoisuudet, ¹ $\mu\text{g}/\text{m}^3$		Tieliikenteen päästöt, t/a		Tieliikenteen aiheuttamat pitoisuudet, $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
	Taajamat	Haja- asutusalueet	Taajamat	Haja- asutusalueet	Taajamat	Haja- asutusalueet
Pienhiukkaset ($\text{PM}_{2,5}$)	11	8	3 785	3 771	2,5	0,25
Dieselhiukkaset ¹	-	-	3 361	3 238	2,2	0,22
Sulfaatti	2,8	2,4	603 (SO_2)	573 (SO_2)	0,03	0,02
Nitraatti	2	1	56 928 (NO_2)	70 109 (NO_2)	0,60	0,20
TSP yhteensä	45	20	-	-	25	4
CO, 1-h	10	0,75	201 601	93 914	9,50	0,50
O ₃ , 6-h	100	120	56 928 (NO_2)	70 109 (NO_2)	- ³	7,50
SO ₂	4	2	603	573	0,50	0,05

¹ Sisältää taustan ja kaikki lähteet.

² Sisältyvät pienhiukkasten ($\text{PM}_{2,5}$) pitoisuuksiin.

³ Liikenteen vaikutusta taajamien otsonipitoisuuksiin ei ole voitu arvioida. Liikenteen päästöt alentavat aluksi taajamissa otsonipitoisuuksia ja otsonin muodostus päästöistä tapahtuu hitaasti, kun päästöt ovat jo kulkeutuneet pois taajamista.

Hiukkaspitoisuudet

Dieselliikenteestä aiheutuu tyypillisesti melko korkeat suorat hiukkaspäästöt. Päästöt sisältävät mm. nokea ja erilaisia hiilivetyjä. Tieliikenteen kaikkien suorien hiukkaspäästöjen aiheuttamiksi pitoisuuksiksi on taajamissa keskimäärin arvioitu 2,5 ja haja-asutusalueilla 0,25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Dieselhiukkasten aiheuttamiksi pitoisuuksiksi on arvioitu bensiini- ja dieselkäyttöisten ajoneuvojen hiukkaspäästöjen suhteessa 2,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ taajamiin ja 0,22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ haja-asutusalueille.

Sulfaatti

Sulfaatti muodostuu ilmakehässä vähitellen rikkidioksidista. Sulfaattia myös kaukokulkeutuu tehokkaasti, jolloin kaukokulkeumalla on huomattavaa vaikutusta Suomessa havaittaviin pitoisuuksiin. Tieliikenteellä on vähäinen vaikutus sulfaattipitoisuuksiin ja sen aiheuttamaksi keskimääräiseksi pitoisuudeksi on taajamissa arvioitu 0,03 ja 0,02 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ haja-asutusalueilla.

Nitraatti

Nitraatti muodostuu ilmakehässä vähitellen typpiyhdisteistä, ja nitraattia myös kaukokulkeutuu. Tieliikenteen aiheuttamaksi keskimääräiseksi nitraattipitoisuudeksi on taajamissa arvioitu 0,60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ja haja-asutusalueilla 0,20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Kokonaisleijuma (TSP)

Kokonaisleijumalla tarkoitetaan kaikkia ilmassa olevia hiukkasia. Pitoisuudet ovat Suomessa suhteellisen korkeita ja ohjearvot ylittyvät taajamissa melko yleisesti. Pitoisuudet aiheutuvat kuitenkin pääosin tieliikenteen aiheuttamasta ns. resuspensiosta; teille kerääntynyt materiaali - jauhautunut hiekoitushiekka, kulunut asfaltti yms. - kohoaa ilmaan liikenteen aiheuttaman turbulenssin takia. Suorien päästöjen ja ilmakehässä päästöistä muodostuneiden hiukkasten aiheuttama osuus kokonaisleijumasta on pieni. Terveysvaikutuksiltaan tällaiset hiukkaset ovat todennäköisesti kuitenkin haitallisempia resuspensiosta peräisin oleviin hiukkasiin verrattuna.

Tieliikenteen aiheuttamat kokonaisleijumapitoisuudet muodostuvat suorista päästöistä, ilmakehässä kaasumaisista epäpuhtauksista muodostuvista hiukkasista sekä resuspensiosta. Resuspensiosta ei ole kvalitatiivisia arvioita käytettävissä, mutta resuspensio lisääntyy liikennesuoritteiden funktiona (mm. Laukkanen ja Jouttijärvi 1990). Tässä yhteydessä on arvioitu, että koko tieliikenteen resuspensio aiheuttaisi suuruusluokaltaan $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pitoisuuden taajamissa ja $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ haja-asutusalueilla. Arvio perustuu eri mittausasemien tuloksiin, joista on vähennetty tausta, liikenteen suorien päästöjen sekä muiden lähteiden vaikutukset. Arviossa aivan liikenteen välittömässä vaikutuspiirissä olevien mittausasemien tulokset on jätetty pois.

TSP muodostuu pääosin ns. suurista hiukkasista, jotka laskeutuvat melko nopeasti. Kokonaisleijumapitoisuus pieneneekin hyvin nopeasti etäisyyden kasvaessa lähdealueelta. Tämä on otettu huomioon vaikutuslaskelmissa; on oletettu että vain osa väestöstä altistuu tieliikenteen aiheuttamille TSP-pitoisuuksille. Resuspension aiheuttamalle likaantumishaitalle altistuvan väestön määrä perustuu arvioihin tieliikenteen aiheuttamalle melulle altistuvasta väestöstä. Melu, kuten resuspension aiheuttama likaantuminen, on luonteeltaan paikallinen haitta. Tällöin altistuvia ihmisiä olisi noin 880 000.

Hiilimonoksidi

Hiilimonoksidi- eli häkäpitoisuudet ovat myös melko alhaisia Suomessa katalysaattoreiden ja reformuloitujen polttoaineiden ansioista. Pitoisuudet aiheutuvat miltei kokonaan bensiinikäyttöisten henkilöautojen päästöistä. Tieliikenteen aiheuttamaksi keskimääräiseksi maksimituntikeskiarvoksi on arvioitu taajamissa $9,5 \text{ mg}/\text{m}^3$ ja haja-asutusalueilla $0,5 \text{ mg}/\text{m}^3$.

Otsoni

Otsonia ei ole päästöissä vaan se muodostuu alailmakehässä vähitellen lähinnä typen oksidin ja hiilivetyjen reagoidessa auringon valossa. Otsonin käyttäytyminen ilmakehässä on varsin monimutkaista. Pohjois-Euroopan olosuhteissa alailmakehän otsoni on ns. taustailmanlaadun ongelma; taajamissa otsoni reagoi herkästi aluksi muiden epäpuhtauksien kanssa, jolloin pitoisuudet ovat alhaisempia kuin haja-asutusalueilla.

Otsonin muodostus muista epäpuhtauksista tapahtuu vasta kymmenien tai satojen kilometrien etäisyydellä päästölähteistä. Keski-Euroopasta tulevalle kaukokulkeumalla on huomattava vaikutus Suomessa havaittaviin pitoisuuksiin, etenkin keväällä ja kesällä havaittaviin lyhytaikaisesti kohonneisiin pitoisuuksiin. Nykykäsityksen mukaan myös

keskimääräinen otsonitaso koko pohjoisella pallonpuoliskolla olisi kohonnut tämän vuosisadan aikana noin kaksinkertaiseksi.

Suomen päästöjen vaikutusta vallitseviin otsonipitoisuuksiin on kvantitatiivisesti erittäin vaikea arvioida mm. monimutkaisen ilmakemian ja Keski-Euroopasta tulevan kaukokulkeuman vaikutuksen takia. Mallitustulosten avulla voidaan kuitenkin suuntaa-antavasti arvioida Suomen omien päästöjen aiheuttavan suuruusluokaltaan $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pitoisuuslisän päiväpitoisuuksiin Lindforsin ym. (1995) tulosten pohjalta. Typen oksidit ovat keskeisin otsoninmuodostukseen vaikuttava yhdiste Suomessa. Kun noin 50 % päästöistä tulee liikenteestä, tieliikenteen aiheuttamaksi 6-tunnin pitoisuudeksi haja-asutusalueilla voidaan arvioida $7,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Taajamissa on paikallisesti, esimerkiksi Helsingin Töölön kaupunginosassa, mitattu lähellä luonnon taustapitoisuutta olevia pitoisuuksia. Useimpien taajama-alueiden otsonia kuluttava vaikutus ei kuitenkaan ole näin voimakas. Kattavia selvityksiä tästä asiasta ei ole tehty ja sen vuoksi liikenteen vaikutusta taajamien otsonipitoisuuteen ei ole arvioitu. Joka tapauksessa se on huomattavasti vähäisempi kuin haja-asutusalueilla.

Rikkidioksidi

Rikkidioksidipitoisuudet ovat nykyään varsin alhaisia Suomessa ja ovat peräisin pääosin energiantuotannosta sekä kaukokulkeumasta. Tieliikenteen aiheuttamaksi vuosikeskiarvoksi on arvioitu taajamissa suuruusluokka $0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja haja-asutusalueilla $0,05 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

4. ARVOTTAMINEN

Luvuissa 4.1 - 4.9 arvioidaan tieliikenteen päästöjen aiheuttamia ympäristökustannuksia. Arvioissa ovat mukana terveysvaikutukset (kuolleisuus- ja sairastuvuusriski), vaikutukset rakennettuun ympäristöön (rakennusmateriaalien syöpyminen eli korroosio sekä likaantuminen), vaikutukset luontoon (metsiin ja satoihin) sekä ilmastonmuutoksen vaikutukset. Vaikutuksista esimerkiksi vesistöihin, kulttuurihistoriallisesti merkittäviin kohteisiin ja luonnon virkistysarvoon ei vielä ole voitu tehdä rahallista arviota.

Arvioitaessa terveysvaikutuksia käytetään altistuvana väestönä taulukossa 4-1 esitettyjä väestömääriä vuonna 1996.

Taulukko 4-1 Altistuvat väestömäärät väestöryhmittäin taajamissa, haja-asutusalueilla sekä koko maassa vuonna 1996 (Tilastokeskus 1997a)

Väestöryhmä	Taajamat	Haja-asutusalueet	Yhteensä
Yli 30-vuotiaat (61 %)	2 400 000	750 000	3 100 000
Yli 65-vuotiaat	560 000	180 000	740 000
Astmaatikoit (3,5 %)	140 000	40 000	180 000
Aikuiset	3 100 000	980 000	4 080 000
Lapset (alle 16 vuotta)	790 000	250 000	1 030 000
Koko väestö	3 900 000	1 200 000	5 100 000

Astmaatikkojen määränä on käytetty ExternE:ssä arvioitua osuutta 3,5 % väestöstä (Euroopan komissio 1997a). Ongelmana astmaatikkojen määrän arvioinnissa on astman määrittely. KELA:n erityiskorvattaviin astmalääkkeisiin oikeutettuja on Suomessa 2,8 % väestöstä (Kansaneläkelaitos 1996), mutta eräiden arvioiden mukaan astmaatikkoja olisi jopa 5 % väestöstä (Keuhkovammaliitto).

4.1 Kuolleisuusriski

ExternE-tutkimuksessa käytiin läpi lukuisia eri selvityksiä ilman epäpuhtauspitoisuuksien ja kuolleisuuden riippuvuudesta. Tässä suoritettut arviot perustuvat ExternE-projektissa suositeltuihin altistus-vaikutusfunktioihin. (Euroopan komissio 1997a)

ExternE-projektissa erotettiin toisistaan kaksi erilaisista syistä johtuvaa kuolleisuusvaikutusta. "Akuuteiksi kuolemantapauksiksi" määriteltiin tapaukset, jotka johtuvat vallitsevasta ilman epäpuhtauspitoisuudesta, esimerkiksi huonokuntoisten yksilöiden altistumisesta äkillisille korkeammille pitoisuuksille. "Krooniseksi kuolleisuudeksi" määriteltiin jonkin alueen väestössä tapahtuva elinvuosien menetys, joka johtuu monivuotisesta kuormituksesta. Akuutissa tapauksessa keskimääräisen eliniän lyhenemisen todettiin olevan noin yhdeksän kuukautta. Kroonisessa kuolleisuudessa yksi henkilö saattaa menettää useita vuosia tai menetetyt elinvuodet voivat jakautua väestössä tasaisemmin. Pope ym. (1995) tutkimuksiin perustuvat "krooniselle kuolleisuudelle" laaditut altistusvaikutusfunktiot arvioivat siis hiukkasten vuoksi yhden kalenterivuoden aikana menetettyjä elinvuosia (YOLL), eivät kuolemantapausten lukumäärää. Tässä selvityksessä

käytetyt ilman epäpuhtauspitoisuuden ja kuolleisuusriskin väliset yhteydet sekä käytetyt yksikköarvot on koottu seuraavaan taulukkoon.

Kroonista kuolleisuutta arvioitiin ExternE:ssä (1997a) perustuen Pope ym. (1995) pohjalta laadittuihin altistus-vaikutusfunktioihin. ExternE:n epidemiologi (Hurley 1999) on esittänyt epäilyksen, että funktiot eivät selitä riittävän hyvin elinikäisen altistuksen merkitystä kuolleisuudelle. Epidemiologisissa tutkimuksissa tutkimusvuosina vallitsevat pitoisuudet hallitsevat tuloksia, vaikka suuri osa kroonisesta altistuksesta on voitu saada aiempina elinvuosina, jolloin pitoisuudet tyypillisesti ovat olleet korkeampia. Tämän vuoksi hän esittää funktioiden yliarvioivan vaikutusta ja suosittelee käyttämään 50 % lievempää altistus-vaikutusfunktiota.

Taulukko 4-2 Tutkimuksia ilman epäpuhtauspitoisuuden ja kuolleisuusriskin yhteydestä sekä käytettävät yksikköarvot (1997 rahassa)

Krooninen kuolleisuus				
Päästö	Tutkimus	Funktio /YOLL ¹	Altistuva väestö	Yksikkökustannus (ExternE)
Nitraatti ja PM ₁₀ (energiantuotannon suorat hiukkaspäästöt)	Pope ym. (1995)	0,00072 / 2	yli 30-vuotiaat	485 000 mk /menetetty elinvuosi
PM _{2,5} (dieselhiukkaset ja sulfaatti)	Pope ym. (1995)	0,0012 / 2	yli 30-vuotiaat	485 000 mk /menetetty elinvuosi
Akuutti kuolleisuus				
Päästö	Tutkimus	Funktio /tapaukset	Altistuva väestö	Yksikkökustannus
Nitraatti ja PM ₁₀ (energiantuotannon suorat hiukkaspäästöt)	Spix ja Wichmann (1996), Verhoeff ym. (1996)	0,040 %	koko väestö	668 000 mk /tapaus
PM _{2,5} (dieselhiukkaset ja sulfaatti)	Spix ja Wichmann (1996), Verhoeff ym. (1996)	0,068 %	koko väestö	668 000 mk /tapaus
SO ₂	Anderson ym. (1996), Touloumi ym. (1996)	0,072 %	koko väestö	668 000 mk /tapaus
Otsoni	Sunyer ym. (1996)	0,059 %	koko väestö	668 000 mk /tapaus

¹YOLL ilmaisee yhden kalenterivuoden aikana altistuvassa väestössä menetetyt elinvuodet yhteensä, ei kuolemantapausten lukumäärää (YOLL = Years of life lost).

“Akuutti kuolleisuus”

Akuutille kuolleisuudelle laaditut altistus-vaikutusfunktiot arvioivat sitä, kuinka paljon kuolleisuus lisääntyy normaaliin kuolleisuuteen nähden eli kuolemantapausten lukumäärää eikä väestön menettämiä elinvuosia. ExternE-projektissa suositeltu vuoden 1995 hintatasolla ollut maksuhalukkuutta ilmaiseva yksikkökustannus 116 250 ECU muunnetaan Suomen markoiksi vuoden 1995 keskimääräisellä valuuttakurssilla ja korjataan vuoden 1997 hintatasoon kuluttajahintaindeksillä. Tällöin yksikkökustannukseksi saa-

daan 668 000 mk tapaukselta. Kuolleisuusriskin arvioinnissa käytetyt pitoisuudet on arvioitu luvussa 3 ja altistuvat väestömäärät on esitetty taulukossa 4-1. Altistuvana väestönä on koko väestö. Normaali keskimääräinen vuotuinen kuolleisuus Suomessa on 0,9 % väestöstä. Tulokset on esitetty taulukossa 4-3.

Taulukko 4-3 Tieliikenteen aiheuttamien hiukkas-, rikkidioksidi- ja otsonipitoisuuksien "akuutteja kuolemantapauksia" lisäävä vaikutus

	Hiukkaset	Sulfaatti	Nitraatti	SO ₂	Otsoni	Yhteensä ¹
Altistuva väestö						
Taajamat	3 900 000	3 900 000	3 900 000	3 900 000	3 900 000	3 900 000
Haja-asutusalueet	1 200 000	1 200 000	1 200 000	1 200 000	1 200 000	1 200 000
Pitoisuudet, µg/m ³						
Taajamat	2,5	0,03	0,6	0,5	-	
Haja-asutusalueet	0,2	0,02	0,2	0,05	7,5	
Kuolleisuuden lisäys, lukumäärä						
Taajamat	64	0,76	9,0	13,5	-	87
Haja-asutusalueet	2,0	0,16	0,95	0,43	52	56
Yhteensä	66	0,92	10	14	52	143
Kustannukset, milj. mk vuodessa						
Taajamat	42,5	0,5	6,0	9,0	-	58,0
Haja-asutusalueet	1,3	0,1	0,6	0,3	35,0	37,3
Yhteensä ¹	43,9	0,6	6,6	9,3	35,0	95,3

¹ Kaikkien rivien ja sarakkeiden summat eivät täsmää, sillä lukuja on pyöristetty.

"Krooninen kuolleisuus"

Kuolleisuusriskin arvioinnissa käytetyt pitoisuudet on arvioitu luvussa 3 ja altistuvat väestömäärät on esitetty taulukossa 4-1. Altistuvana väestönä menetettyjä elinvuosia (YOLL) arvioitaessa on yli 30-vuotias väestö. ExternE-projektissa suositeltu vuoden 1995 hintatasolla ollut maksuhalukkuutta ilmaiseva arvo yhdelle elinvuodelle 84 330 ECU muunnetaan Suomen markoiksi vuoden 1995 keskimääräisellä valuuttakurssilla ja korjataan vuoden 1997 hintatasoon kuluttajahintaindeksillä. Tällöin yksikkökustannukseksi saadaan 485 000 mk menetetyltä elinvuodelta. Tulokset on esitetty taulukossa 4-4.

Taulukko 4-4 Tieliikenteen aiheuttamista hiukkaspitoisuuksista johtuva "krooninen kuolleisuus" eli elinvuosien menetys (YOLL)

	Hiukkaset	Sulfaatti	Nitraatti	Yhteensä ¹
Altistuva väestö				
Taajamat	2 400 000	2 400 000	2 400 000	2 400 000
Haja-asutusalueet	750 000	750 000	750 000	750 000
Pitoisuudet, µg/m ³				
Taajamat	2,5	0,03	0,6	
Haja-asutusalueet	0,25	0,02	0,2	
Menetettyt elinvuodet, lkm				
Taajamat	3 569	43	514	4 126
Haja-asutusalueet	113	9	54	176
Yhteensä	3 682	52	568	4 301
Kustannukset, milj. mk/a				
Taajamat	1 729	21	249	1 999
Haja-asutusalueet	55	4	26	85
Yhteensä¹	1 784	25	275	2 084

¹ Kaikkien rivien ja sarakkeiden summat eivät täsmää, sillä lukuja on pyöristetty.

Kuolleisuuden aiheuttamat kustannukset yhteensä

Tieliikenteen päästöjen aiheuttaman kuolleisuuden kustannukset on arvioitu yhteensä noin 4 264 milj. markaksi vuodessa. Tästä valtaosa aiheutuu "kroonisesta kuolleisuudesta". Seuraavassa taulukossa 4-5 on esitetty yhteenveto kuolleisuuden aiheuttamista kustannuksista.

Taulukko 4-5 Tieliikenteen aiheuttaman "akuutin ja kroonisen" kuolleisuuden kustannukset yhteensä, milj. mk/a (1997 rahassa)

Kustannukset alueittain	Hiukkaset	Sulfaatti	Nitraatti	SO ₂	Otsoni	Yhteensä ¹
Taajamat	1 772	21	255	9,0	-	2 057
Haja-asutusalueet	56	4	27	0,3	35,0	123
Yhteensä, milj. mk/a¹	1 828	26	282	9,3	35,0	2 179

¹ Kaikkien rivien ja sarakkeiden summat eivät täsmää, sillä lukuja on pyöristetty.

4.2 Sairastuvuusriski

Taulukkoon 4-6 on koottu kaikki ExternE:ssä (Euroopan komissio 1997a) sairastuvuusriskin arviointiin suositellut altistus-vaikutusfunktiot sekä yksikköarvot hintatasolla 1997. Arviot suoritetaan käyttämällä kahdesta eri lähteestä olevia yksikköarvoja. Toisaalta käytetään ExternE-projektissa suositeltuja vuoden 1995 tasolla olleita yksikköarvoja, jotka tässä on muutettu vuoden 1997 tasolle kuluttajahintaindeksin avulla. Toisaalta käytetään suomalaisen contingent valuation -tutkimukseen perustuvia yksikköarvoja. Näitä täydennetään osittain ExternE:ssä suositelluin arvoin, sillä kaikille tässä

arvioitaville oireille ei kotimaisessa tutkimuksessa muodostettu yksikköarvoja. (Energia-Ekono Oy 1998b).

Taulukko 4-6 Tutkimuksia ilman epäpuhtauspitoisuuden ja sairastuvuusriskin yhteydestä sekä erilaisten sairauksien yksikkökustannuksia.

Oire	Tutkimus	Sairastuvuuden lisääntyminen ^{1,2}	Altistuva väestö	Yksikköarvo (ExternE) - mk -	Yksikköarvo (suom. tutk.) - mk -
Hiukkaset					
Astma, keuhkoputkia laajentavien lääkkeiden käyttö	Dusseldorp ym. 1995	0,163-0,272	astmaattiset aikuiset	213	138
Astma, yskä	Dusseldorp ym. 1995	0,168-0,280	astmaattiset aikuiset	40	91
Astma, hengityksen vinkuminen	Dusseldorp ym. 1995	0,061-0,101	astmaattiset aikuiset	43	97
Astma, keuhkoputkia laajentavien lääkkeiden käyttö	Roemer et ym. 1993	0,078-0,129	astmaattiset lapset	213	138
Astma, yskä	Pope ja Dockery 1992	0,133-0,223	astmaattiset lapset	40	91
Astma, hengityksen vinkuminen	Roemer ym. 1993	0,103-0,172	astmaattiset lapset	43	97
Lasten krooninen yskä	Dockery ym. 1989	0,00207-0,00346	lapset	1 293	1 268
Lasten keuhkoputkentulehdus	Dockery ym. 1989	0,00161-0,00269	lapset	1 293	1 267
Rajoittuneen toimintakyvynpäivä ⁴	Ostro 1987	0,025-0,042	aikuiset	431	568
Sairaalasiesiintymä, hengitystieoireilu	Dab ym. 1996	2,07E-6-3,46E-6	koko väestö	45 218	10 619
Sairaalasiesiintymä, aivoverisuoniin vaikuttava sairaus	Wordley ym. 1997	5,04E-6-8,42E-6	koko väestö	45 218	10 619
Sairaalasiesiintymä, sydämen vajaatoiminta	Schwartz ja Morris 1995	1,85E-5-3,09E-5	yli 65-vuotiaat	45 218	10 619
Krooninen keuhkoputkentulehdus, uusi tapaus	Abbey ym. 1995	4,9E-5-7,8E-5	aikuiset	603 000	603 000 ³
Syöpäriski, ei fataali syöpä	Pilkington ja Hurley 1997	4,86E-7	koko väestö	2 586 000	2 586 000 ³
Rikkidioksidi SO₂					
Sairaalasiesiintymä, hengitystieoireilu	Ponce de Leon 1996	2,04E-6	koko väestö	45 218	10 619
Hiilimonoksidi CO					

Oire	Tutkimus	Sairastuvuuden lisääntyminen ^{1,2}	Altistuva väestö	Yksikköarvo (ExternE)	Yksikköarvo (suom. tutk.)
				- mk -	- mk -
Sairaalisäännöto, sydämen vajaatoiminta	Schwartz ja Morris 1995	5,55E-7	yli 65-vuotiaat	45 218	10 619
Otsoni					
Astmakohtaus	Whittemore ja Korn 1980	0,00429	astmaattikot	213	138
Lievästi rajoittuneen toimintakyvyn päivä ⁴	Ostro ja Rothschild 1989	0,00976	aikuiset	43	97
Sairaalisäännöto, hengitystieoireilu	Ponce de Leon 1996	3,54E-6	koko väestö	45 218	10 619
Oireilupäivä	Krupnick ym. 1990	0,033	koko väestö	43	97
Hiilivedyt					
Bentseeni: syöpäriski, leukemia	Pilkington ja Hurley 1997	1,14E-7	koko väestö	11 836 000	
Bentso[a]pyreeni: syöpäriski, keuhkosyöpä	Pilkington ja Hurley 1997	1,43E-3	koko väestö	7 641 000	
1,3-butadieeni: syöpäriski, leukemia	Pilkington ja Hurley 1997	4,29E-6	koko väestö	11 836 000	

¹Luvut ilmaisevat sairastuvuuden arvioidun muutoksen vuodessa pitoisuuden muuttuessa. Hiukkasten, rikkidioksidin ja hiilivetyjen vaikutuksille käytetään vuosikeskiarvoa, hiilimonoksidille suurimpia tuntipitoisuuksia ja otsonille kuuden tunnin keskiarvoa.

²Alempaa arviota käytetään nitraatin haittojen arvioimiseksi ja ylempää dieselhiukkasten sekä sulfaatin vaikutuksille.

³Suomalaisessa tutkimuksessa ei muodostettu tälle sairaudelle tai oireelle yksikkökustannusta, joten käyttöön on otettu ExternE:ssä suositeltu yksikkökustannus.

⁴Päällekkäisyyden välttämiseksi rajoittuneen toimintakyvyn päivien määrästä on vähennettävä 10 hengitystieoireista, 7 sydämen vajaatoiminnasta 45 aivoverisuonien toimintahäiriöstä johtuvaa sairaalisäännötoa, sillä näiden tilojen edellytyksenä on, että kyseessä on myös rajoittuneen toimintakyvyn päivä. Myös otsonin aiheuttamista lievästi rajoittuneen toimintakyvyn päivistä on vähennettävä astmakohtaukset.

Hiukkaset

ExternE-projektissa päädyttiin suosittelemaan tällä hetkellä käytettäväksi kolmeatoista erilaista tai eri väestöryhmiin kohdistuvaa altistus-vaikutusfunktioita, jotka on esitetty taulukossa 4-6. Altistus-vaikutusfunktioita ei ole käytettävissä kaikille tunnetuille hiukkasten aiheuttamille vaikutuksille eikä kaikissa väestöryhmissä. Seuraavissa arvioissa käytettyjen pitoisuuksien arviointi on kuvattu luvussa 3. Käytetyt yksikköarvot on esitetty taulukossa 4-6.

Syöpäriskiä lukuunottamatta hiukkasten kaikki vaikutukset arvioidaan erikseen hiukkaspäästöille, sulfaatille ja nitraatille. Syöpäriskiä arvioidaan vain dieselhiukkasille. Yhteenlasketut tulokset on esitetty taulukossa 4-7.

Taulukko 4-7 Tieliikenteen aiheuttamista hiukkaspitoisuuksista johtuvat sairastapaukset, kpl/a, ja niistä aiheutuva taloudellinen haitta, milj. mk/a (1997 rahassa)

Vaikutus, vaikutuksenalainen väestönosa	Tapaukset - kpl/a -	Kustannukset ExternE-arvoin - milj. mk/a -	Kustannukset suomal. arvoin - milj. mk/a -
Astma, keuhkoputkia laajentavien lääkkeiden käyttö, aikuiset	89 329	19,0	12,3
Astma, yskä, aikuiset	91 950	3,7	8,3
Astma, hengityksen vinkuminen, aikuiset	33 178	1,4	3,2
Astma, keuhkoputkia laajentavien lääkkeiden käyttö, lapset	10 689	2,3	1,5
Astma, yskä, lapset	18 468	0,7	1,7
Astma, hengityksen vinkuminen, lapset	14 243	0,6	1,4
Krooninen yskä, lapset	8 186	10,6	10,5
Keuhkoputkentulehdus, lapset	6 365	8,2	8,1
Rajoittuneen toimintakyvyn päivä, aikuiset	388 556	167,4	220,6
Sairaalasiesäaotto, hengitystieoireilu, koko väestö	40,6	1,8	0,4
Sairaalasiesäaotto, aivoverisuonien toimintahäiriö, koko väestö	98,9	4,5	1,1
Sairaalasiesäaotto, sydämen vajaatoiminta, yli 65-vuotiaat	52,6	2,4	0,6
Krooninen keuhkoputkentulehdus, uusi tapaus, aikuiset	737	444,4	444,4
Syöpäriski, koko väestö	4,3	11,1	11,1
Taloudellinen haitta yhteensä, milj. mk/a		678	725

Rikkidioksidi

Toistaiseksi rikkidioksidin terveysvaikutuksista arvioidaan hengitysteiden oireilusta johtuvia sairaalasiesäaottoja (respiratory hospital admissions RHA) perustuen Ponce de Leon:in (1996) tutkimukseen (ks. taulukko 4-6). Luvussa 3 arvioitiin rikkidioksidipitoisuudeksi taajamissa $0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja haja-asutusalueilla $0,05 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Näillä oletuksilla rikkidioksidin aiheuttamaksi haitaksi saadaan 4,1 tapausta vuodessa. Taloudelliseksi haitaksi saadaan 44 000 mk vuodessa kotimaisin yksikköarvoin ja ExternE:ssä suositelluin yksikköarvoin 186 000 mk vuodessa (1997 rahassa).

Hiilimonoksidi

ExternE-projektissa hiilimonoksidin (CO) aiheuttamasta sydämen vajaatoiminnasta johtuvia yli 65-vuotiaiden sairaalasisäänottoja on suositeltu arvioitavaksi Schwartz ja Morris (1995) mukaan (ks. taulukko 4-6). Luvussa 3 arvioitiin hiilimonoksidin maksimipitoisuudeksi taajamissa $9,5 \text{ mg/m}^3$ ja haja-asutusalueilla $0,5 \text{ mg/m}^3$. Näillä oletuksilla hiilimonoksidin aiheuttamaksi haitaksi saadaan 3 027 tapausta vuodessa. Taloudelliseksi haitaksi saadaan 32 milj. mk vuodessa kotimaisin yksikköarvoin ja ExternE:ssä suositelluin yksikköarvoin 137 milj. mk vuodessa (1997 rahassa).

Otsoni

Arvio otsonin terveysvaikutusten kustannuksista on esitetty seuraavassa taulukossa. Arviossa käytetyt altistus-vaikutusfunktiot ja yksikkökustannukset on koottu taulukkoon 4-6 ja pitoisuusarviot on esitetty luvussa 3. Otsonin haitat kohdistetaan typen oksideille ja hiilivedyille suhteessa 80:20 (Seppälä ja Jouttijärvi 1997). Liikenteen ei luvussa 3 arvioitu kohottavan taajamien otsonipitoisuutta ja haja-asutusalueilla vaikutus otsonipitoisuuden 6-tunnin keskiarvon arvioitiin olevan $7,5 \text{ } \mu\text{g/m}^3$.

Taulukko 4-8 Otsonin terveysvaikutusten aiheuttaman sairastuvuuden haitta, tapaus-ten lukumäärä, kpl/a, ja niistä aiheutuva taloudellinen haitta, milj mk/a (1997 rahassa)

Vaikutus (altistuva väestö)	Tapaukset - kpl/a -	Kustannukset ExternE-arvoin - milj. mk/a -	Kustannukset suomal. Arvoin - milj. mk/a -
Astmakohtaus (kaikki astmaatikot)	1 400	0,3	0,2
Lievästi rajoittuneen toimintakyvyn päivä (aikuiset)	70 600	3,0	6,9
Sairaalasisäännotot, hengitystieoireilu (koko väestö)	33	1,5	0,3
Oireilupäivä (koko väestö)	305 000	13,1	30
Haitta yhteensä, milj. mk/a		18	37

Hiilivedyt

ExternE-projektissa suositeltiin syöpäriskin arvioimista bentseenille, bentso[a]pyreenille ja 1,3-butadienille (ks. taulukko 4-6). Näitä vaikutuksia ei ole kuitenkaan arvioitu, sillä pitoisuuksista ei ole voitu tehdä riittävän luotettavia arvioita.

Hiilivedyt muodostavat yhdessä typen kanssa otsonia. 20 % arvioiduista otsonin terveysvaikutuksista on kohdistettu hiilivedyille (Seppälä ja Jouttijärvi 1997). Kustannukset olisivat tällöin 7,4 milj. mk vuodessa suomalaisin yksikköarvoin ja 3,6 milj. mk ExternE:ssä käytetyin yksikköarvoin arvioituna (ks. taulukko 4-8).

Muut epäpuhtaudet

ExternE-projektissa ei ole päädytty suositteluun tässä vaiheessa typen oksidien suorien terveysvaikutusten arviointia, sillä tutkimusten näyttöä pidetään toistaiseksi riittämättömänä. Typen oksidien tiedetään aiheuttavan terveysvaikutuksia, mutta vaikutusten määrällisessä arvioimisessa tarvittavia riittävän luotettavia altistus-vaikutusfunktioita ei vielä ole laadittu. Esimerkiksi APHEA-tutkimuksessa (Touloumi ym. 1996) on esitetty altistus-vaikutusfunktio typpidioksidin aiheuttamille akuuteille kuolemantapauksille ja ExternE:ssä käytettiin Ponce de Leon ym. (1996) esittämiä altistus-vaikutusfunktioita herkkyytarkasteluissa hengitystieoireilusta johtuville sairaalasisäänötoille. Näitä altistus-vaikutusfunktioita ei kuitenkaan tässä selvityksessä ole sovellettu johdonmukaisuuden vuoksi. Mikäli NO_2 :n suorien terveysvaikutusten kustannukset voitaisiin arvioida, tulisi näistä todennäköisesti huomattava lisäys kokonaishaitta-arvioon.

Typen oksidin muodostavat yhdessä hiilivetyjen kanssa otsonia. 80 % arvioiduista otsonin terveysvaikutuksista on kohdistettu typen oksideille (Seppälä ja Jouttijärvi 1997). Haja-asutusalueilla typen aiheuttaman otsoninmuodostuksen kustannukset olisivat tällöin 29,6 milj. mk vuodessa suomalaisin yksikköarvoin ja 14,4 milj. mk ExternE:ssä käytetyin yksikköarvoin arvioituna (ks. taulukko 4-8).

Muita terveysvaikutuksia aiheuttavia yhdisteitä ovat mm. raskasmetallit. ExternE:ssä ei (vielä) ole suositeltu, että arvioita näistä sisällytettäisiin perustarkasteluihin. Syynä tähän on riittävän luotettavien altistus-vaikutusfunktioiden puute.

Sairastuvuuden aiheuttamat kustannukset yhteensä

Seuraavassa taulukossa 4-9 on esitetty yhteenveto tieliikenteen aiheuttamien sairastapauksien kustannuksista. Yhteenvetoon on otettu ensisijaisesti suomalaisin yksikköarvoin arvioidut haitat.

Taulukko 4-9 Tieliikenteen aiheuttaman sairastuvuuden kustannukset yhteensä, milj. mk/a (1997 rahassa)

Sairastuvuus	Taajamat	Haja-asutusalueet	Yhteensä ¹
Hiukkaset (ml. dieselhiukkaset)	601	19	620
Sulfaatti	7,1	1,5	8,6
Nitraatti	87,3	9,2	96,5
Rikkidioksidi	0,04	0,001	0,04
Hiilimonoksidi	31,6	0,5	32,1
Otsoni	-	37,0	37,0
Yhteensä, milj. mk/a¹	727	67	794

¹ Kaikkien rivien ja sarakkeiden summat eivät täsmää, sillä lukuja on pyöristetty.

4.3 Rakennusmateriaalien rapautuminen

Fossiilisten polttoaineiden poltosta peräisin olevalla happamoittavalla laskeumalla on yhteys rakennusten ja materiaalien syöpymiseen. Keskeisimmät syöpymistä aiheuttavat yhdisteet ovat rikkidioksidi, hiukkaset ja kloridit. Myös typen oksidit voivat olla osallisia prosessissa, mutta niiden vaikutuksesta rakennusmateriaaleihin ei olla vielä täysin selvillä.

Vuonna 1984 käynnistettiin Pohjoismaiden Ministerineuvoston rahoituksella pohjoismainen yhteistyöhanke, jonka päämääränä oli tuottaa luotettavaa tietoa ilman laadusta johtuvan korroosion kustannuksista (Kucera ym., 1993). Ensin tehtiin inventaario ulkoilmassa olevien rakennusten ja muiden rakenteiden materiaalien pinta-aloista Tukholmassa ja Sarpsborgissa Norjassa. Seuraavaksi kehitettiin malli ilman epäpuhtauksista aiheutuvien korroosiohaittojen laskemiseksi. Mallia sovellettiin Tukholmaan, Sarpsborgiin ja Prahaan.

Vuonna 1994 valmistui ruotsalainen tutkimus Svenska miljöräkenskaper SWEEA (Konjunkturinstitutet och Statistiska Centralbyrån, 1994). Tämän tutkimuksen rakennusmateriaaleja koskeva osa, johon myös Kucera osallistui, pohjautui hänen aiempaan tutkimukseensa. Siinä menetelmää kehitettiin edelleen ja arvioitiin haitta myös muille materiaaleille kuin varsinaisille rakennuksille. Kokonaisvaurioksi saatiin vuoden 1991 tasolla 1 900 miljoonaa kruunua, mikä kattaa kaikista päästölähteistä aiheutuvat haitat.

Tässä suoritetaan haitta-arvio SWEEA:ssa esitettyihin altistus-vaikutusfunktioihin perustuen. Ne ilmaisevat huolto- ja vaihtotiheyden muutoksen ulkoilman rikkidioksidipitoisuuden muuttuessa. Arviointi sisältää seuraavat vaiheet:

1. Materiaalimäärien arviointi
2. Arvio pitoisuudesta, jolle materiaalit altistuvat
3. Arvio huolto- ja vaihtotiheydestä
4. Huolto- ja uusimiskustannusten arviointi

Suomessa ei ole tehty inventaarioita ulkoilmalle alttiina olevista materiaolimääristä. Tässä selvityksessä Suomen materiaolimäärät arvioidaan soveltaen ruotsalaisia tutkimuksia suhteuttamalla määrät asukaslukuun. Näin voitaneen menetellä, sillä tämän tutkimuksen kohdealue täyttää ainakin kohtuullisen hyvin seuraavat tärkeät kriteerit, joiden suhteen vertailualueiden tulisi olla samantapaisia: käytettävät materiaalit, ilmasto, päästöjen laatu ja pitoisuudet sekä materiaali- ja huoltokustannukset ovat samaa suuruusluokkaa.

Vuonna 1996 Suomen taajamien asukasluku oli 3,9 miljoonaa ja haja-asutusalueiden 1,2 miljoonaa kun Tukholman asukasluku materiaali-inventaarion aikana oli 1,4 miljoonaa asukasta. Tämän perusteella arvioidaan materiaolimäärät, jotka on esitetty taulukossa 4-11.

Taulukko 4-10 Materiaalien huolto- tai vaihtotiheys rikkidioksidipitoisuuden ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) funktiona sekä huolto- ja vaihtokustannukset, mk/m^2 (1997 rahassa)

Materiaali	Huolto-/vaihtotiheys - 1/a -	Huolto- kustannus - mk/m^2 -	Vaihto- kustannus - mk/m^2 -
Rappaus (maalattu)	$(15,5 + 0,124 \cdot [\text{SO}_2]) \cdot 10^{-3} \cdot \text{a}^{-1}$		272
Bitumihuopa	$(47,7 + 0,327 \cdot [\text{SO}_2]) \cdot 10^{-3} \cdot \text{a}^{-1}$		208
Maalattu teräs	$(103 + 1,37 \cdot [\text{SO}_2]) \cdot 10^{-3} \cdot \text{a}^{-1}$	100	
Maalattu kuumasinkitty teräs	$(81,5 + 0,803 \cdot [\text{SO}_2]) \cdot 10^{-3} \cdot \text{a}^{-1}$	72	

Materiaali	Huolto-/vaihtotiheys - 1/a -	Huolto- kustannus - mk/m ² -	Vaihto- kustannus - mk/m ² -
Nauhapinnoitettu teräs (uusi)	$(38,0 + 0,155 \cdot [\text{SO}_2]) \cdot 10^{-3} \cdot \text{a}^{-1}$	86	
Nauhapinnoitettu teräs (uud. maalattu)	$(62,9 + 0,370 \cdot [\text{SO}_2]) \cdot 10^{-3} \cdot \text{a}^{-1}$	86	
Nauhapinnoitettu Al (uusi)	$(32,2 + 0,107 \cdot [\text{SO}_2]) \cdot 10^{-3} \cdot \text{a}^{-1}$	86	
Nauhapinnoitettu Al (uud. maalattu)	$(62,9 + 0,370 \cdot [\text{SO}_2]) \cdot 10^{-3} \cdot \text{a}^{-1}$	86	
Maalipinta rappauksella	$(18,8 + 0,278 \cdot [\text{SO}_2]) \cdot 10^{-3} \cdot \text{a}^{-1}$	79	
Maalipinta puulla	$(87,5 + 1,03 \cdot [\text{SO}_2]) \cdot 10^{-3} \cdot \text{a}^{-1}$	93	
Maalaamaton kuumasinkitty teräs	$V_{\text{corr}} = 0,29 + 0,039 \cdot \text{SO}_2$, missä V_{corr} = sinkin korroosionopeus, $\mu\text{m/a}$ ja SO_2 = rikkidioksidipitoisuus, $\mu\text{g/m}^3$	levy 72 profiili 125	levy 258 lanka 57

Keskimääräiseksi tieliikenteestä johtuvaksi rikkidioksidin vuosipitoisuudeksi Suomen taajamissa arvioitiin $0,5 \mu\text{g/m}^3$ ja haja-asutusalueilla $0,05 \mu\text{g/m}^3$. Pitoisuuksien arviointi on kuvattu luvussa 3. Materiaalien huolto- ja vaihtotiheys arvioidaan käyttämällä taulukossa 3-10 esitettyjä SWEEA:n laatimia altistus-vaikutusfunktioita. Huolto- ja uusimiskustannukset arvioidaan käyttämällä samassa taulukossa esitettyjä yksikkökustannuksia. Kotimaisia yksikkökustannuksia ei myöskään ole ollut saatavilla, joten yksikkökustannuksina käytetään Ruotsissa tilastoituja kustannuksia (taulukko 4-10). Tulokset on koottu seuraavaan taulukkoon 4-11.

Taulukko 4-11 Rikkidioksidille altistuvat materiaalimäärät (1000 m²) ja tieliikenteen rikkidioksidipäästöjen aiheuttamien materiaalivaurioiden kustannukset, milj. mk vuodessa (1997 rahassa)

Materiaali	Taajamat		Haja-asutusalueet		Yhteensä
	Materiaali -määrä - 1000 m ² -	Kustannukset - milj. mk/a -	Materiaali -määrä - 1000 m ² -	Kustannukset - milj. mk/a -	Kustannukset - milj. mk/a -
Kuumasinkitty teräs, levy (huollettava)	1 780	0,12	560	0,004	0,13
Kuumasinkitty teräs, levy (vaihdettava)	1 780	0,45	560	0,014	0,46
Kuumasinkitty teräs, profiili	8 180	0,33	2 600	0,011	0,34
Kuumasinkitty teräs, lanka	1 810	0,07	570	0,002	0,07
Rappaus (maalattu)	75 300	1,27	23 800	0,040	1,21
Bitumihuopa	47 600	1,62	15 000	0,051	1,67
Maalattu teräs	7 800	0,54	2 500	0,017	0,55
Maalattu kuumasinkitty teräs	31 600	0,91	9 990	0,029	0,94
Nauhapinnoitettu teräs	20 300	0,14	6 400	0,004	0,14

Materiaali	Taajamat		Haja-asutusalueet		Yhteensä
	Materiaali	Kustan-	Materiaali	Kustan-	Kustan-
	-määrä	nukset	-määrä	nukset	nukset
	- 1000 m ² -	- milj. mk/a -	- 1000 m ² -	- milj. mk/a -	- milj. mk/a -
(uusi)					
Nauhapinnoitettu teräs (uudelleen maalattu)	3 600	0,06	1 100	0,002	0,08
Nauhapinnoitettu alumiini (uusi)	9 800	0,04	3 100	0,001	0,05
Nauhapinnoitettu alumiini (uudelleen maalattu)	1 700	0,03	550	0,001	0,03
Maalipinta rappauksella	75 300	0,83	23 800	0,026	0,85
Maalipinta puulla	118 400	5,68	37 400	0,179	5,86
Yhteensä, milj. mk/a		12,08		0,38	12,5

4.4 Likaantuminen

Ilman epäpuhtaudet aiheuttavat myös materiaalien likaantumista. Likaantumisen syynä ovat pääasiassa noki- ja muut hiukkaset. Ympäristön likaantuminen koskee paitsi rakennetun ympäristön materiaaleja myös puistoja ja viheralueita sekä luonnonympäristöjä. Sisätilojen siivous ja ikkunoiden pesu aiheuttavat kustannuksia; kustannuksia syntyy myös tekstiilien puhtaanapidosta. Lisäksi rakenteiden ja katujen puhdistus ja kunnossapito aiheuttavat huomattavia kustannuksia.

ExternE Transport -projektissa päädyttiin käyttämään Rabl ym. (1996) mukaan seuraavaa yhteyttä hiukkaspitoisuuden ja likaantumiskustannusten välillä:

$$y = \text{TSP} \cdot P \cdot w, \text{ missä}$$

y = likaantumiskustannus

TSP = tieliikenteestä aiheutuva hiukkaspitoisuuden ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) vuosikeskiarvo

P = asukasluku

w = $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ aiheuttama puhdistuskustannus henkeä kohden

Puhdistuskustannuksena käytettiin 1 ECU henkilöä kohden (Euroopan komissio 1997a). Vuoden 1995 valuuttakurssilla muunnettuna tämä vastaa 5,64 mk ja kuluttajahintaindeksillä vuoden 1997 tasolle muutettuna 5,75 mk.

Tieliikenteen aiheuttama kokonaisleijuma (TSP) koostuu pääosin resuspensiosta, dieselhiukkasista sekä muista päästöistä syntyvistä hiukkasista (sulfaatti ja nitraatti). Resuspensio on määräävä tekijä arvioitaessa likaantumisen kokonaishaittaa. Arvioitaessa dieselhiukkasten, sulfaatin ja nitraatin aiheuttamaa likaantumishaittaa altistuvaksi väestöksi oletetaan koko väestö, sillä pienet hiukkaset kulkeutuvat kauas. Resuspensio vaikuttaa pääasiassa teiden välittömässä läheisyydessä olevaan väestöön, sillä suuri osa resuspendoituneista hiukkasista on kooltaan melko suuria, joten ne laskeutuvat nopeasti ja pitoisuudet laskevat nopeasti teiltä etäännyttäessä.

Tämän vuoksi resuspension aiheuttamaa likaantumishaittaa arvioitaessa käytetään huomattavasti pienempää väestöä kuin kaukokulkeutuvien hiukkasten aiheuttamaa likaantumishaittaa arvioitaessa. Väestömääräksi otetaan sama väestönosa kuin altistuu tieliikenteen melulle, sillä myös resuspensiosta johtuva likaantuminen on luonteeltaan paljon paikallinen ongelma. Katujen varsilla melulle altistuu 560 000 henkilöä ja yleisten teiden varsilla 320 000 henkilöä (Survo ja Hänninen 1998), joista 55 000 arvioidaan asuvan haja-asutusalueilla. Tällöin taajamissa resuspension aiheuttamalle likaantumiselle arvioidaan altistuvan 825 000 henkilöä ja haja-asutusalueilla 55 000 henkilöä.

Resuspensiosta johtuvaksi hiukkaspitoisuudeksi arvioitiin luvussa 3 suuntaa-antavasti taajamissa $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja haja-asutusalueilla $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Arvio haitasta on esitetty taulukossa 4-12.

Hiukkaspäästöjen, nitraatin ja sulfaatin aiheuttaman likaantumisen haittakustannukset voidaan kohdistaa hiukkas-, typpi- ja rikkipäästöille. Näin ei kuitenkaan ole mahdollista menetellä resuspension kohdalla. Tämän vuoksi resuspension aiheuttamaa likaantumishaittaa onkin mielekkäintä tarkastella suoritteelle (ajoneuvo-km) kohdistettuna. Eri ajoneuvojen aiheuttamaa resuspensiota suhteessa niiden kokoon ja keskimääräisiin ajonepeuksiin ei ole tutkittu. Tämän vuoksi tässä selvityksessä haitta suhteutetaan suoraan suoritteeseen. Tämä tarkastelutapa yliarvioi kevyempien ajoneuvojen aiheuttamaa haittaa ja aliarvioi raskaampien ajoneuvojen aiheuttamaa haittaa.

Suorite taajamissa oli 20 476 milj. ajoneuvo-km ja haja-asutusalueilla 21 753 milj. ajoneuvo-km. Suoritteelle kohdistettuna tämä tarkoittaa taajamissa 0,57 pennin, haja-asutusalueilla 0,0058 pennin ja keskimäärin 0,28 pennin yksikköhaittaa ajettua kilometriä kohden.

Taulukko 4-12 Tieliikenteen aiheuttamasta hiukkaspitoisuudesta johtuvan likaantumisen haitta, milj. mk/a (1997 rahassa)

	Taajamat	Haja-asutusalueet	Yhteensä
Altistuva väestö			
Koko väestö	3 900 000	1 200 000	5 100 000
Resuspensiolle altistuva väestö	825 000	55 000	880 000
Pitoisuus, $\mu\text{g}/\text{m}^3$			
Hiukkaspäästöt	2,5	0,25	
Nitraatti	0,6	0,2	
Sulfaatti	0,03	0,02	
Resuspensio	25	4	
Yksikköhaitta	5,75 mk henkilöltä / $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$		
Haitta, milj. mk/a			
Hiukkaspäästöt	56,0	1,8	57,8
Nitraatti	13,4	1,4	14,9
Sulfaatti	0,7	0,1	0,8
Resuspensio	118,5	1,3	57,8
Yhteensä	188,6	4,6	193,2

4.5 Happamoittavan laskeuman aiheuttamat metsävauriot

Ilman epäpuhtauksien ja metsävaurioiden määrän yhteydestä on olemassa vain muutama karkea arvio (Ahonen ja Leiviskä 1993, Konjunkturinstitutet & Statistiska Centralbyrån 1994, Nilsson 1991, Sverdrup 1993). Koska ilman epäpuhtauksien ja metsävaurioiden määrän yhteydestä on olemassa vain muutama karkea arvio, tässä selvityksessä voidaan esittää vain laskentaesimerkki käyttäen lähtökohtana näiden tutkimusten tuloksia. Lähtökohtana esitettävässä arviossa on, että happamoitumisesta aiheutuva vuosittainen puunkasvun menetys seuraavan sadan vuoden aikana olisi 0,1 % edellisen vuoden kasvusta.

Arvioissa otetaan huomioon vuotuinen kasvu ja kokonaispoistuma sekä hyödyntämisaaste. Vuosina 1990 - 1994 metsien vuosittainen kasvu on ollut keskimäärin 75,1 milj. m³ (Tilastokeskus 1996). Tällöin vuotuinen puunkasvun menetys olisi 75 100 m³/a. Vuotuisen kokonaispoistuman ja kasvun avulla voidaan arvioida metsien hyödyntämisaaste. Haitan pitkäaikaisesta luonteesta johtuen laskentakorkona käytetään yhtä prosenttia. Taloudellinen menetys lasketaan käyttämällä mänty-, koivu- ja kuusitukkipuun ja -kuitupuun kantohintoja.

Näitä lähtötietoja käyttämällä seuraavassa taulukossa on arvioitu tieliikenteestä aiheutuvasta happamoittavasta laskeumasta johtuvien metsävaurioiden vuotuiset kustannukset. Kustannukset on arvioitu 8,7 milj. markaksi vuodessa.

Taulukko 4-13 Tieliikenteen rikki- ja typpipäästöjen aiheuttamasta happamoittavasta laskeumasta johtuvat metsävauriot, milj. mk vuodessa (1997 rahassa)

	SO ₂	NO _x	NH ₃	Yhteensä
Happamoittavan laskeuman aiheuttama kokonaishaitta		360 milj. mk/a		
Päästön osuus haitasta, %	50 %	30 %	20 %	100 %
Päästön osuus haitasta, milj. mk/a	180	108	72	360
Kotimaisten päästöjen osuus laskeumasta, %	12 %	16 %		
Kotimaisten päästöjen osuus haitasta, milj. mk/a	22	17		
Kotimaisten päästöjen aiheuttama haitta, mk/t	216	66		
Tieliikenteen päästöt, t/a	1 176	127 037		
Tieliikenteen haitta, milj. mk/a	0,3	8,4		8,7

4.6 Otsonin aiheuttamat metsävauriot

YK:n Euroopan talouskomission (UN ECE) alaisuudessa on meneillään kriittisten tasojen kartoitus otsonin ja muiden ilman epäpuhtauksien kasvillisuushaittojen arvioimiseksi. ECE:n otsonin kriittisten tasojen työssä on sovittu, että altistuskokeiden altistusvaikutusfunktiot ja mitatut otsonipitoisuudet esitetään altistusindeksin avulla. Tässä esitettävän arvion perustana käytetään ECE:n alustavaa arviota, jonka mukaan 10 000 ppb-h annos aiheuttaa 10 % kasvutappion herkille puolajelle.

Etelä-Suomessa kasvukauden aikainen altistus oli vuosina 1993-1996 keskimäärin 6 600 ppb-h ja Pohjois-Suomessa 3 800 ppb-h (Metsäntutkimuslaitos 1997). Pohjois- ja

Etelä-Suomen metsävarojen tilavuuksilla painotettuna tämä merkitsisi 5,8 % vuotuista kasvumenetystä eli 4,3 milj. m³ vuotuista tappiota. Otsonin haittavaikutusten oletetaan kohdistuvan vain tarkasteluvuoteen eli haittaa käsitellään vain yksivuotisena, mikä käytännössä aliarvioi haitan suuruutta. Arvioissa otetaan huomioon vuotuinen kasvu ja kokonaispoistuma sekä hyödyntämisaste. Taloudellinen menetys lasketaan käyttämällä mänty-, koivu- ja kuusitukkipuun sekä -kuitupuun kantohintoja.

Taulukossa 4-14 esitetyn arvion mukaan tieliikenteen otsonia muodostavien päästöjen haitta olisi noin 34 milj. markkaa vuodessa.

Taulukko 4-14 Tieliikenteen päästöistä muodostuvasta otsonista johtuvat yksivuotiset metsävauriot, milj. mk vuodessa (1997 rahassa)

	NO _x	Hiilivedyt	Yhteensä
Otsonin aiheuttama kokonaishaitta		511 milj. mk/a	
Osuus haitasta, %	80 %	20 %	100 %
Osuus haitasta, milj. mk/a	409	102	511
Kotimaisten päästöjen osuus, %	16 %	16 % ¹	
Kotimaisten päästöjen osuus haitasta, milj. mk/a	65,5	16,4	82
Kotimaisten päästöjen aiheuttama haitta, mk/t	252	41	
Tieliikenteen päästöt, t/a	127 037	51 506	
Tieliikenteen haitta, milj. mk/a	32,0	2,1	34,1

¹Koska tiedossa ei ole, miten suuri osuus hiilivedyistä on peräisin kotimaasta, laskelmassa oletetaan hiilivetyypäästöjen olevan peräisin kotimaasta samassa suhteessa kuin typpipäästöjen.

4.7 Viljelykasvivauriot

Alailmakehän otsoni on ilman epäpuhtauksista merkittävin satotappioiden aiheuttaja. Se aiheuttaa sekä hehtaarisatojen pienenemistä että näkyviä vaurioita, kuten lehdissä ja hedelmissä esiintyviä pilkkuja, jotka saattavat aiheuttaa kokonaisten tuotantoerien hylkäämisen. Myös hapan laskeuma vaurioittaa viljelykasveja, mutta se on kuitenkin haitallisempi metsille kuin viljelykasveille, koska viljelykasveja suojellaan peltojen kalkituksen avulla.

Euroopan unioni on hyväksynyt kasvillisuuden suojelemiseksi vuorokausikeskiarvon rajaksi 65 µg/m³, mikä ylittyy kesäisin yleisesti Suomen kaikilla mittausasemilla. Otsonin vaikutus viljelykasveihin Suomen oloissa on vielä puutteellisesti tunnettu ja joidenkin arvioiden mukaan satotappiot ovat olleet muutaman prosentin luokkaa (Ahonen ja Leiviskä 1993 ref. Kauppi ym. 1990). Laurila (Wahlström ym. 1996) on arvioinut alailmakehän otsonin vähentäneen kevätvehnäsatoja merkittävästi 1990-luvun alkupuolella haitan ollessa vuoden 1990 vallitsevilla otsonipitoisuuksilla vain pari prosenttia, mutta vuonna 1992 jopa 12 %.

Tässä haitta-arvio tehdään perustuen Hasund ym. (1990) kokoamiin altistusvaikutusfunktioihin (ks. taulukko 4-15), tausta-asetilla mitattuihin otsonipitoisuuksiin, 1990-luvulla toteutuneisiin viljelypinta-aloihin ja satomääriin sekä viljelykasvien maa-ilmanmarkkinahintoihin. Lisäksi huomioon otetaan tyypitase eli ulkomailta Suomeen kulkeutuva tyyppi. Tarkastelussa mukana olevat viljelykasvit ovat vehnä, ruis, ohra, kauraa, peruna, kuivaheinä ja säilörehu. Hasundin kokoamia funktioita on korjattu ohran,

kauran, kuivaheinän ja säilörehun osalta 20 % alaspäin mm. johtuen huonoista sadoista seuraavasta siirtymisestä kestävämpiin lajikkeisiin.

Taulukko 4-15 Otsonin aiheuttamien satotappioiden laskennassa käytetyt korjatut altistus-vaikutusfunktiot. Otsonipitoisuuden yksikkönä on keskimääräinen ppb kasvukauden päivätunteina.

Viljelykasvi	Altistus-vaikutusfunktio	Vaihteluväli
Syysvehnä	$1 - 0,8 \cdot (O_3(X) / 0,148)^{2,154}$	-30 % ... + 100 %
Kevätvehnä	$1 - 0,8 \cdot 4,5576 \cdot O_3(X)$	-20 % ... + 20 %
Syysruis	$1 - 0,8 \cdot 4,5576 \cdot O_3(X)$	-40 % ... + 200 %
Ohra	$1 - 0,8 \cdot 0,8 \cdot 1,0817577 \cdot O_3(X)$	-20 % ... + 20 %
Kaura	$1 - 0,8 \cdot 0,8 \cdot 4,5576 \cdot O_3(X)$	0 % ... + 300 %
Peruna	$0,9615 - 0,8 \cdot 8,3535 \cdot O_3(X)$	-20 % ... + 20 %
Timotei, apila	$1 - 0,8 \cdot 0,8 \cdot 7,909 \cdot O_3(X)$	-30 % ... + 100 %

Vuosina 1990 - 1992 kasvukauden otsonipitoisuuden keskiarvoksi päivätunneilla on mitattu 60 - 85 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ eli 30 - 42,5 ppb, keskimäärin 34,5 ppb (Tilastokeskus 1994). Alailmakehän otsonipitoisuudet kasvavat noin prosentin vuodessa (Watson ym. 1990). Vuoden 1995 pitoisuus on arvioitu kasvattamalla vuosien 1990 - 1992 keskiarvoa prosentilla vuodessa, jolloin tulokseksi saadaan 36,3 ppb, mikä vastaa noin 73 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Alailmakehän otsoni muodostuu fotokemiallisesti eli auringonsäteilyn avulla typen oksideista ja hiilivedyistä. Otsonin muodostumisessa typen oksidien osuudeksi oletetaan 80 % ja hiilivetyjen (metaani ja muu VOC) osuudeksi 20 % (Seppälä ja Jouttijärvi 1997). Suomen päästölähteiden osuudeksi otsonia muodostavista yhdisteistä on arvioitu 16 % (Tilastokeskus 1997b). Luonnolliseksi taustapitoisuudeksi on arvioitu 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ eli 15 ppb (Hasund ym. 1990). Otsonin aiheuttamat yritystaloudelliset menetykset lasketaan vähentämällä nykyiset tuotot niistä tuotoista, jotka saataisiin luonnollisella otsonin taustapitoisuudella.

Yksityiskohtaisen otsonimallin puuttuessa mielekkäin tarkastelutapa haitalle on seuraava "top-down"-lähestymistapa:

1. Arvioidaan otsonin luonnon taustapitoisuuden (15 ppb) ylittävän pitoisuuden (35,2 ppb) aiheuttamat satotappiot koko Suomessa.
2. Kotimaisten päästölähteiden osuus Suomessa vaikuttavista typpipäästöistä ja arvio otsonin kokonaismuodostuksesta on 16 %. Arvioidut kokonaissatotappiot jaetaan tyypelle ja hiilivedyille suhteessa 80:20.
3. Lasketaan tieliikenteen osuus otsonia muodostavista päästöistä; typpidioksidista osuus oli 49 % (Tilastokeskus 1997c) ja VOC-päästöistä 13 % (Tilastokeskus 1998) vuonna 1996. Näiden suhteiden avulla lasketaan tieliikenteen osuus kaikista kotimaisista lähteistä syntyvistä satotappioista tyypelle ja hiilivedyille erikseen.
4. Taulukossa 4-16 on esitetty eri viljelykasvien viljelypinta-alat vuonna 1996, keskimääräinen hehtaarisato ja sen avulla arvioidut satomäärät. Hehtaarisato lasketaan vuosien 1994 - 1996 keskiarvona (Tilastokeskus 1997c), sillä tarkasteluvuoden heh-

taarisatoa käyttämällä vuotuiset sääolosuhteiden vaihtelut dominoisivat. Yksikkökustannuksina käytetään EU:n tuottajahintoja vuonna 1997 (EUROSTAT 1998), jotka myös on esitetty taulukossa 4-16. Koska kuivaheinällä ja säilörehulla ei juurikaan ole markkinoita tilojen tuottaessa yleensä tarvitsemansa rehun itse, käytetään näiden osalta kustannuksena tuotantokustannusta (Maaseutukeskusten Liitto 1998).

Taulukko 4-16 Maataloustuotanto Suomessa ja viljelykasvien maailmanmarkkinahinnat

	Maa-ala yhteensä - 1000 ha -	Keskim. sato - kg/ha -	Sato - milj. kg -	Maailman- markkinahinta - mk/kg -
Syysvehnä	25	4 071	103	0,75
Kevätvehnä	87	3 845	336	0,75
Syysruis	35	2 606	92	0,72
Ohra	543	3 506	1 902	0,70
Kaura	374	3 380	1 265	0,79
Peruna	35	21 329	742	0,73
Kuivaheinä	244	4 019	979	1,39
Säilörehu	302	17 711	5 356	0,36

Seuraavassa taulukossa on esitetty arvio tieliikenteen päästöjen aiheuttamasta taloudellisesta haitasta. Haitasta vain noin 6 % eli 1,5 milj mk on arvioitu aiheutuvan hiilivedyistä. Tämä hyvin alhainen haitta-arvio johtuu siitä, että tieliikenteen osuus kotimaisista lähteistä syntyvistä VOC-päästöistä on vain 13 % ja hiilivetyjen painoarvoksi otsoninmuodostuksessa on puolestaan arvioitu 20 %.

Taulukko 4-17 Tieliikenteen päästöistä muodostuvan otsonin aiheuttamat satovauriot, milj. mk/a (1997 rahassa)

	Osuus kokonais- haitasta - % -	Haitta - milj. mk/a -	Haitan vaihteluväli - milj. mk/a -
Syysvehnä	0,7	0,17	0,12 - 0,34
Kevätvehnä	5,4	1,3	1,0 - 1,6
Syysruis	1,4	0,3	0,2 - 1,0
Ohra	5,5	1,3	1,0 - 1,6
Kaura	17	4,1	4,1 - 16,5
Peruna	21	5,1	4,1 - 6,2
Kuivaheinä	41	9,8	6,8 - 19,5
Säilörehu	8,0	1,9	1,3 - 3,8
Yhteensä	100	24,1	18,8 - 50,5

4.8 Ilmastonmuutos

Fossiilisten polttoaineiden käytöstä ilmaan pääsevien kasvihuonekaasujen, erityisesti hiilidioksidin, lisääntymisestä ilmakehässä on seurauksena ilmaston lämpeneminen.

ExternE-tutkimushankkeessa (Euroopan komissio 1997a ja 1997b) päädyttiin suosittamaan ohjelman aiemmista vaiheista poikkeavia uusia arvioita ilmaston lämpenemisen aiheuttamalle haitalle; suositeltu malli oli FUND (kehittäjänä Institute for Environmental Studies, Amsterdam). Laskentakorkona käytettiin 1 - 3 %, jolloin saatiin tulokseksi 18 - 46 ECU/hiilidioksiditonni vuodessa. Tämä vastaa 102 - 260 mk/t vuoden 1995 kursilla Suomen rahaksi muutettuna ja 108 - 275 mk/t vuoden 1997 markkoissa OECD-maiden BKT-indeksillä muunnettuna. Käytetään haitta-arviona ylä- ja alarajan keskiarvoa eli 191 mk/t. Samaa haitta-arviota on käytetty myös suomalaisessa tutkimuksessa *Tuulivoiman ja aurinkosähkön kilpailukyky ympäristöhyödyt huomioon ottaen* (Energia-Ekono 1998a).

Muut kasvihuonekaasut kuin CO₂ muunnetaan usein CO₂-ekvivalenteiksi GWP (globaali lämmityspotentiaali) hyväksi käyttäen. GWP on suhdeluku, joka kuvaa kasvihuonekaasun lämmittävää vaikutusta sadan vuoden ajanjakson aikana hiilidioksidin suhdeluvun ollessa yksi. ExternE:ssä on suositeltu seuraavia IPPC:n (Pearce ym. 1996) esittämiä muuntokertoimia: tonni CH₄ vastaa 21 tonnia CO₂-ekvivalenteja ja tonni N₂O vastaa 310 tonnia CO₂-ekvivalenteja. Tutkimuksessa *Tuulivoiman ja aurinkosähkön kilpailukyky ympäristöhyödyt huomioon ottaen* käytettiin suhdelukuina vastaavasti 11 ja 270 perustuen IPPC:n vuonna 1992 antamaan suositukseen (IPPC 1992).

Koska kyseessä on globaali haitta, otetaan käytön päästöjen lisäksi samanarvoisina huomioon polttoaineketjujen alkupään päästöt. Nämä päästöt on esitetty taulukossa 2-4.

Taulukko 4-18 Tieliikenteen päästöt CO₂-ekvivalenteina ja arvio haitoista. Päästöissä on mukana polttoaineketjujen alkupään päästöt.

	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Yhteensä ¹
Päästöt yhteensä, 1000 t/a	11 246	4,6	0,9	
Muuntokerroin	1	21	310	
CO ₂ -ekvivalenttina, 1000 t/a	11 246	97	291	11 635
Yksikkökustannus, mk/t CO ₂	191	191	191	
Haitta, milj. mk/a¹	2 150	19	56	2 224

¹ Kaikkien rivien ja sarakkeiden summat eivät täsmää, sillä lukuja on pyöristetty.

Vuoden 1996 haitta-arvioksi polttoaineiden käytön osalta saadaan 2 034 milj. mk ja polttoaineketjujen alkupään osalta ulkomailla 53 milj. mk ja kotimaassa 137 milj. mk eli yhteensä noin 2 224 milj. mk (1997 rahassa). Alueellisesti jaettuna haitaksi liikenteelle sekä taajamissa että haja-asutusalueilla saadaan 1,1 miljardia mk kun polttoaineketjujen alkupään haitat kohdistetaan liikenteelle taajamissa ja haja-asutusalueilla samassa suhteessa kuin päästöjä syntyy polttoaineiden käyttövaiheesta.

4.9 Työkoneiden haitat

Työkoneiden arvioitiin (ks. taulukko 2-6) kuluttavan vuodessa 18 milj. litraa citydieseliä ja 16,5 milj. litraa kevyttä polttoöljyä. Tieliikenteen polttoaineiden käytön haitta-arvioksi saadaan luvussa 4-14 bensiinille 0,82 mk/litra ja dieselille 2,02 mk/litra. Tässä työssä käytetään jälkimmäistä haitta-arviota arvioitaessa citydieselin käytön haittaa. Kevyt polttoöljy on käytännössä ominaisuuksiltaan samaa polttoainetta kuin diesel; erona on vain verotuksen vuoksi lisätty väriaine. Tämän vuoksi myös kevyen polttoöljyn haittojen arvottamisessa voidaan käyttää dieselin yksikkökustannusta.

Tällöin dieselkäyttöisten ajoneuvojen haitta-arvioksi saadaan 0,36 milj. mk vuodessa. Kevyttä polttoöljyä käyttävien koneiden ja lauttojen haitta-arvioksi saadaan 0,33 milj. mk vuodessa. Kokonaishaitaksi muodostuu 0,7 milj. mk vuodessa (1997 rahassa).

4.10 Sähkön hankinnan haitat

Suomen keskimääräisiä sähkönhankinnan ympäristökustannuksia on arvioitu projektissa *Suomen rautatieliikenteen polttoaineperäisten päästöjen aiheuttamat ympäristökustannukset* (Energia-Ekono 1998c). Projektissa tehtiin arvio rautatieliikenteen tarvitseman sähkön hankinnan ympäristökustannuksista. Lähtökohtana oli aiemmin ilmestynyt selvitys *Tuulivoiman ja aurinkosähkön kilpailukyky ympäristöhyödyt huomioon ottaen* (Energia-Ekono 1998a). Tässä projektissa arvioitiin fossiilisiin ja biopolttoaineisiin perustuvan energiantuotannon aiheuttamat ympäristökustannukset Suomen sähköntuotannossa. Rautatieliikenteen sähkönhankinnan ympäristöhaittojen kustannuksia arvioitaessa otettiin huomioon myös ydin- ja vesivoima sekä tuonti. Haitta-arvioksi ostosähkölle saatiin ilman siirtohäviöitä 5,4 p/kWh ja siirtohäviöt huomioon ottaen 5,5 p/kWh (vuoden 1997 rahassa). Sähkön hankinnan polttoaineketjujen alkupään haittoiksi saatiin 3,2 % käytetyn sähkön haitoista, mikä on lisättävä haitta-arvioon.

Arviot perustuivat eri primaarienergialähteiden käyttöön ja tuontiin vuonna 1995. Mikäli primaarienergialähteiden käytössä tai tuotantotekniikoissa ja puhdistuslaitteissa tapahtuu oleellisia muutoksia, olisi tätä haitta-arviota tarkastettava.

Tieinfrastruktuurin osalta tarkastelussa on ollut vain tievalaistuksen sähkönkäyttö, joka oli 100 GWh vuonna 1996. Täten infrastruktuurin sähkönhankinnan haitaksi saadaan 5,5 milj. mk vuodessa (1997 rahassa). Sähkön hankinnan polttoaineketjujen alkupään haittoiksi saadaan 0,2 milj. mk.

4.11 Polttoaineketjujen alkupään haitat

Käytetään luvussa 4.13 esitettäviä (taulukko 4-22) kunkin päästökomponentin yksikkökustannuksia haja-asutusalueilla arvioitaessa polttoaineketjujen alkupään päästöjen haittoja. Bensiinin ja dieselin polttoaineketjujen päästöt on arvioitu luvussa 2.3. Sähkön hankinnan polttoaineketjujen alkupään haitta-arvio on 3,2 %.

Taulukko 4-19 Polttoaineketjujen alkupään haitat sekä polttoaineiden käytön haitat yhteensä, milj. mk/a (1997 rahassa)

Komponentti	Yksikkö- haitta - mk/t -	Pa-ketjujen alkupää		Käytön haitat		Yhteensä ¹ - milj. mk/a -
		Bensiini - milj. mk/a -	Diesel - milj. mk/a -	Bensiini - milj. mk/a -	Diesel - milj. mk/a -	
SO ₂	12 000	12,9	11,2	16	41	81
NO _x	2 300	5,0	5,1	288	225	524
PM _{2,5}	20 000	4,3	2,9	284	2 222	2 513
CO	6	0,003	0,003	29	3	32
Hiilivedyt (myös CH ₄ otsonin muodostuksen osalta)	350	1,6	1,1	14	4	21
CH ₄ (ilmaston- muutoksen osalta)	4 000	mukana käytön haitassa		11	8	19
N ₂ O	59 000	mukana käytön haitassa		39	17	56
CO ₂	191	mukana käytön haitassa		1 170	981	2 151
Resuspensio		ei arvioida		89	31	120
Yhteensä, milj. mk/a		23,8	20,3	1 936	3 535	5 515
Infran sähkön käyttö ²	3,2 %	0,2		5,5		6
Yhteensä, milj. mk/a¹		44		5 477		5 521

¹ Kaikkien rivien ja sarakkeiden summat eivät täsmää johtuen pyöristyksistä.

² Sähkön käytön polttoaineketjujen alkupään haitta-arvio on 3,2 prosenttia infrastruktuurin sähkön käytön haitta-arviosta 5,5 milj. mk.

Kappaleessa 4.13 arvioidaan tieliikenteen aiheuttamaksi kokonaishaitaksi ilman infrastruktuurin sähkönkäyttöä 5 471 milj. mk (ks. taulukko 4-21). Tällöin polttoaineketjujen alkupään päästöjen haittojen aiheuttama lisä tähän kokonaishaittaan on keskimäärin noin 0,81 %. Bensiinikäyttöisten ajoneuvojen osalta lisäys on 1,2 % ja dieselkäyttöisten ajoneuvojen osalta 0,57 %. Arvioitaessa ilmastonmuutoksen haittoja käytön haitoiksi on laskettu myös polttoaineketjujen alkupäässä syntyvät haitat, sillä haitta on globaali eikä päästöjen syntypaikalla ole merkitystä. Polttoaineketjujen alkupään haitta-arvioon liittyvää epävarmuutta on käsitelty luvussa 5.

4.12 Ulkomaille kulkeutuvien päästöjen haitat

Ulkomaille kulkeutuvien päästöjen haitat arvioidaan samoilla yksikkökustannuksilla kuin haja-asutusalueilla arvioidut haitat. Yhteenlasketuksi haitta-arvioksi saadaan 6,3 % käytön haitoista. Bensiinikäyttöisten ajoneuvojen osalta haitta-arvio on 149 milj. mk vuodessa eli 7,7 % ja dieselkäyttöisten ajoneuvojen osalta 197 milj. mk vuodessa eli 5,6 %.

Taulukko 4-20 Ulkomaille kulkeutuvien päästöjen aiheuttamat haitat yhteensä, milj. mk vuodessa (1997 rahassa)

	Päästöt yhteensä - t/a -	Ulkomaille kulkeutuvat - % -	Ulkomaille kulkeutuvat - t/a -	Yksikkö- haitta - mk/t -	Haitta - milj. mk/a -
Rikki	1 176	68 %	800	12 000	10
Typpi	127 037	81 %	102 900	2 300	232
Hiukkaset	7 557	68 %	5 138	20 000	105
Haitta, milj. mk/a					346
Käytön haitat, milj. mk/a					5 471
Ulkomaille kulkeutuvat, %					6,3 %

Ulkomaille kulkeutuvien päästöjen haitta-arvioon liittyvää epävarmuutta on käsitelty luvussa 5.

4.13 Yhteenveto tieliikenteen haitoista

Taulukkoon 4-21 on koottu luvuissa 4.1 - 4.12 arvioidut eri tyyppisten haittojen kustannukset taajamissa ja haja-asutusalueilla. Tuloksissa korostuvat terveysvaikutukset ja ilmastomuutoksen vaikutukset.

Taulukko 4-21 Tieliikenteen haitat yhteensä, milj. mk/a (1997 rahassa)

Vaikutus	Taajamat	Haja-asutusalueet	Yhteensä
Kuolleisuus	2 057	123	2 179
Sairastuvuus	727	67	794
Materiaalivauriot, korroosio	12,1	0,4	12,5
Materiaalivauriot, likaantuminen	188,6	4,6	193,2
Metsävauriot, happamoituminen		8,7	8,7
Metsävauriot, otsoni		34,1	34,1
Satovauriot		24,1	24,1
Ilmastonmuutos	1 145	1 079	2 224
Yhteensä, milj. mk/a	4 130	1 341	5 471
Työkoneiden päästöt			0,7
Infrastruktuurin sähkönkäyttö			5,5
Polttoaineketjujen alkupää ¹			44
Ulkomaille kulkeutuvat päästöt			346
Yhteensä, milj. mk/a			5 864

¹ Sisältää bensiinin ja dieselin polttoaineketjujen haittojen 44 milj. mk lisäksi myös sähkönkäytön polttoaineketjujen haitat 0,2 milj. mk.

Kokonaishaitat on kohdistettu eri päästökomponenteille seuraavassa taulukossa 4-22. Kun kaikki kunkin päästökomponentin aiheuttamat haitat lasketaan yhteen ja jaetaan päästömäärällä, saadaan kunkin päästökomponentin yksikkökustannus (mk/t). Käytettäessä näitä yksikkökustannuksia jonkin tieosuuden haitta-arvioihin on tuloksiin lisättävä

resuspension aiheuttaman likaantumisen haitta. Infrastruktuurin tarvitseman sähkön hankinnan haitta voidaan arvioida käyttämällä luvussa 4.8 arvioitua yksikkökustannusta 5,8 p/kWh.

Taulukko 4-22 Tieliikenteen haitat päästökomponenteittain

Komponentti	Yksikkö	Taajamat	Haja-asutusalueet	Keskimäärin
SO ₂	mk/t	83 000	12 000	49 000
NO _x	mk/t	6 200	2 300	4 000
PM _{2,5} ¹	mk/t	640 000	20 000	330 000
CO	mk/t	160	6	110
Hiilivedyt ²	mk/t	350	350	350
Kasvihuonekaasut				
CO ₂ -ekvivalentteina ³	mk/t	191	191	191
Likaantuminen (resuspensio) ⁴	p/ajoneuvo-km	0,57	0,0058	0,28

¹ PM_{2,5} tarkoittaa tässä liikenteen suoria hiukkaspäästöjä. Sulfaatin ja nitraatin aiheuttamat haitat on kohdistettu rikki- ja typpipäästöille.

² Hiilivetyjen muodostaman otsonin aiheuttamat haitat. Hiilivedyt sisältävät myös metaanin. Metaanin aiheuttaman ilmastomuutoksen kustannukset arvioidaan CO₂-ekvivalentteina.

³ CO₂, CH₄ ja N₂O aiheuttaman ilmastomuutoksen haitta arvioidaan muuntamalla muut kasvihuonekaasut CO₂-ekvivalenteiksi. Tämä tapahtuu GWP-kertoimilla 21 CH₄:lle ja 310 N₂O:lle.

⁴ Resuspension lisäksi likaantumista aiheuttavat myös hiukkaspäästöt, sulfaatti ja nitraatti. Näiden likaantumishaitta on kohdistettu hiukkas-, rikki- ja typpipäästöille.

4.14 Tieliikenteen aiheuttaman haitan kohdistaminen suoritteille

Arvioidut ympäristökustannukset kohdistetaan eri ajoneuvotyypeille käyttäen hyväksi taulukossa 2-2 laskettuja keskimääräisiä päästökertoimia (g/km) ja taulukossa 4-22 esitettyjä yksikkökustannuksia (mk/t). Tulos on esitetty taulukossa 4-23.

Laskennassa käytetyt päästökertoimet on saatu jakamalla LIISA 96:n laskemat kokonaispäästömäärät suoritteella. Luvut sisältävät koko kaluston keskimääräiset päästökertoimet sekä kylmäkännistyksistä että joutokäynnistä aiheutuvan lisäpäästön. On huomattava, että lasketut keskimääräiset päästökertoimet ovat voimakkaita yleistyksiä ajoneuvotyypeittäin. Eri ikäisten, ja erityisesti kuorma-autojen kohdalla eri painoisten, ajoneuvojen päästökertoimet poikkeavat huomattavasti toisistaan. Tällöin myös taulukossa 4-23 esitetyt yksikköhaitat (p/km) ovat yleistyksiä. Jonkin ajoneuvotyypin yksikköhaitta (p/km) voidaan arvioida tarkemmin kertomalla kyseisen ajoneuvotyypin päästökerroin (g/km) taulukossa 4-22 esitetyillä päästötonnien yksikkökustannuksilla (mk/t).

Taulukko 4-23 Haitta suoritteille kohdistettuna, p/ajoneuvo-km (1997 rahassa)

Ajoneuvo	Taajamat	Haja-asutusalueet - p / ajoneuvo-km -	Keskimäärin
Henkilöautot, ei katalysaattoria	9,1	4,5	6,7
Henkilöautot, katalysaattori	5,6	3,7	4,6
Henkilöautot, diesel	35	3,9	19
Pakettiautot, ei katalysaattoria	13	6,6	11
Pakettiautot, katalysaattori	7,8	5,4	6,8
Pakettiautot, diesel	22	6,4	16
Linja-autot	120	19	79
Kuorma-autot, ei perävaunua	95	17	59
Kuorma-autot, perävaunu	128	25	50

Haitta-arviot voidaan kohdistaa myös polttoaineiden käytölle. Tämä on tehty taulukossa 4-24. Haitta-arvioksi bensiinilitraa kohden saadaan keskimäärin 0,82 markkaa ja diesel-litraa kohden keskimäärin 2,02 markkaa.

Taulukko 4-24 Haitta polttoaineille kohdistettuna, mk/litra (1997 rahassa)

Ajoneuvo	Haitta - milj. mk/a -		Polttoaineen kulutus - t/a -		Polttoaineen kulutus - milj. l/a -		Haitta - mk/l -	
	Bensiini	Diesel	Bensiini	Diesel	Bensiini	Diesel	Bensiini	Diesel
Henkilöautot, ei katal.	1 416		1 206 376		1 609		0,88	
Henkilöautot, katal.	459		521 542		695		0,66	
Henkilöautot, diesel		738		202 764		239		3,09
Pakettiautot, ei katal.	58		47 411		63		0,92	
Pakettiautot, katal.	2		2 030		3		0,65	
Pakettiautot, diesel		506		284 290		334		1,51
Linja-autot		714		239 032		281		2,54
Kuorma-autot, ei peräv.		935		364 950		429		2,18
Kuorma-autot, perävaunu		680		412 090		485		1,40
Yhteensä (mk/l keskim.)	1 934	3 573	1 777 359	1 503 126	2 370	1 768	0,82	2,02

Polttoaineen käytölle kohdistettujen haittojen erojen merkittävin selittävä tekijä ovat hiukkaspäästöt. Suuri ero bensiini- ja dieselkäyttöisten ajoneuvojen haitoissa polttoaineiden käytölle kohdistettuna selittyy pääosin bensiinikäyttöisten ajoneuvojen alhaisemmilla hiukkaspäästöillä. Vaikka dieselkäyttöisten henkilöautojen hiukkaspäästöt suoritetta kohden (g/km) ovatkin alle puolet kuorma-autojen ominaispäästöistä, ovat hiukkaspäästöt kulutettua polttoainetta kohden (g/l) lähes kaksinkertaiset. Sama suhde ei kuitenkaan päde muihin päästökomentteihin. Perävaunulla varustettujen kuorma-autojen hiukkaspäästöistä yli 70 % syntyy haja-asutusalueilla, kun muiden kuorma-autojen hiukkaspäästöistä vain yli 40 % syntyy haja-asutusalueilla.

Tuoreen ruotsalaisen tutkimuksen mukaan (Naturvårdsverket 1998) uusien dieselkäyttöisten ajoneuvojen ympäristöhaitat ovat noin 2 kruunua litralta. Uusien bensiinikäyttöisten ajoneuvojen ympäristöhaitat arvioitiin yhdeksi kruunuksi litralta. Tässä selvityk-

sessä keskimääräiselle autokannalle tehdyt arviot ovat johdonmukaisesti hieman suurempia. Laskentaperusteissa on kuitenkin eroja, joten tulokset eivät ole suoraan vertailukelpoisia. Ruotsalaisessa selvityksessä hiilidioksidipäästöjen arvottaminen perustuu niiden verotukseen, mutta esimerkiksi hiukkasten vaikutusten kustannusten on arvioitu olevan samaa suuruusluokkaa kuin tässä selvityksessä.

5. TULOSTEN LUOTETTAVUUDEN ARVIOINTIA

5.1 Epävarmuustekijät

Saatuihin arvioihin ympäristökustannuksista liittyy merkittävää epävarmuutta. Tästä huolimatta niistä voidaan päätellä haittojen suuruusluokka ja myös se, mitkä vaikutukset ja päästökomponentit ovat todennäköisesti merkittävimpiä. Koska bensiini- ja dieselkäyttöisiä ajoneuvoja on tarkasteltu samalla menetelmällä, on mahdollista tehdä päätelmiä näiden keskinäisestä ympäristötaloudellisesta merkityksestä.

Epävarmuudet liittyvät päästö- ja pitoisuusarvioihin, altistus-vaikutusfunktioihin, yksikkökustannuksiin ja laskentakorkoon. Luotettavia funktioita ei myöskään toistaiseksi ole läheskään kaikille altistus-vaikutusyhteyksille kuten typen oksidien terveysvaikutuksille. Tämä saattaa johtaa haittojen aliarviointiin. Vähäisempi epävarmuuden lähde on inventaario altistuvista kohteista kuten väestö-, materiaali- ja satomäärät.

Liikenteen päästöt otettiin LIISA 96-laskentajärjestelmästä. LIISA-järjestelmään liittyy eräitä epävarmuustekijöitä, joista yksi keskeinen on katusuoritteiden arvioiminen. Arvio perustuu asukaslukuun. Menetelmä yliarvioi päästöjä sellaisissa kaupungeissa kuin esimerkiksi Espoo ja Vantaa, jossa oikeita katuja ja katusuoritettakin on vähän, mutta joissa asukasluvun perusteella syntyy paljon suoritetta.

Myös pitoisuusarvioihin liittyy epävarmuuksia. Toisaalta liikenteen aiheuttaa päästöjä varsin tasaisesti eri puolilla Suomea ja päästöjen aiheuttamista pitoisuuksista on runsaasti mittaus- ja leviämismallitietoja käytettävissä. Täten pitoisuuksien suuruusluokkarvio on todennäköisesti oikealla tasolla. Tiedon yleistäminen Suomen taajamiin ja haja-asutusalueille on tulkinnanvaraista. Erillisiä leviämismallilaskelmia ei ollut tämän projektin puitteissa mahdollista tehdä ja niihinkin sisältyy tyypillisesti muutaman kymmenen prosentin epävarmuus. Pitoisuusarvioiden tarkkuutta olisi kuitenkin mahdollista edelleen parantaa mallinnuksella ja mittauksilla. Epävarmuutta aiheuttaa myös se, että kaikkien ilman epäpuhtauksien pitoisuuksia (VOC, raskasmetallit, otsonipitoisuudet taajamissa) ei ole voitu lähtötietojen puutteellisuuden vuoksi arvioida.

Terveysvaikutusten arviointiin käytettäville altistus-vaikutusfunktioille ja yksikkökustannuksille on yleensä tiedossa joko virherajat tai keskihajonta. Altistus-vaikutusfunktioiden luottamusvälit ovat tavallisesti huomattavasti pitoisuuden luottamusvälejä suurempia. Koska tässä selvityksessä ei kuitenkaan ollut mahdollista tehdä leviämismallilaskelmia, pitoisuuksien arviointiin liittyvä epävarmuus on vähintään samaa luokkaa kuin altistus-vaikutusfunktioihin liittyvä epävarmuus. Altistus-vaikutusfunktioiden tai maksuhalukkuusarvioiden siirto muualta Euroopasta tai Yhdysvalloista Suomen olosuhteisiin sisältää epävarmuutta. Yksi keskeisiä epävarmuustekijöitä on riittävän luotettavien altistus-vaikutusfunktioiden puuttuminen typpidioksidin suorille terveysvaikutuksille. Vaikutuksia on voitu arvioida vain nitraatin ja otsonin muodostuksen kautta.

Materiaalivaurioiden haitta-arvion virhe muodostuu pitoisuuden, altistuvien materiaalmäärien, altistus-vaikutusfunktioiden ja yksikköarvojen virheestä. Suomessa altistuvat materiaalmäärät on arvioitu skaalaamalla Tukholmassa inventoidut eri materiaalien

määrät Suomen ja Tukholman asukaslukujen suhteessa. Tähän arvioon sisältyy virhemahdollisuus, jonka suuruudesta ei ole tarkkaa tietoa kuten ei myöskään altistusvaikutusfunktioiden ja yksikköarvojen virheistä.

Metsävaurioihin sisältyy merkittävää epävarmuutta, jonka suuruuden arvioiminen ei kuitenkaan ole tällä hetkellä mahdollista. Merkittävimpiä virhelähde lienevät otsonin ja happamoitumisen arvioitiin käytetyt altistus-vaikutusfunktiot. Varsinkin otsonin metsiä vaurioittavan vaikutuksen tutkiminen on vasta alussa. Happamoitumista on tutkittu huomattavasti enemmän, mutta vielä ei ole kiistattomasti voitu osoittaa, kuinka suuren haitan nykyiset ja ennakoituvat päästötasot tulevat aiheuttamaan. Esitetyt arviot haitasta ovat lähinnä esimerkkilaskelmia, joiden lopputulos parhaimmillaan arvioi haitan suuruusluokkaa. Vaikka tulokset sisältävätkin huomattavaa epävarmuutta, on niistä pääteltävissä, että metsävaurioiden aiheuttamat taloudelliset menetykset ovat todennäköisesti selvästi pienemmät kuin esimerkiksi terveysvaikutusten.

Satotappioiden laskemisessa käytettyihin altistus-vaikutusfunktioihin sisältyi arvio virherajoista. Funktioiden lisäksi pieni virhemahdollisuus on viljelypinta-aloissa ja sato-määrissä, joista on käytetty useampivuotisia keskiarvoja. Myös laskelmassa käytettyyn otsonipitoisuuteen sisältyy jonkin verran epävarmuutta. Lisäksi tietyn sektorin tai liikennemuodon osuuden arviointi kaikista otsonin aiheuttamista satotappioista sisältää epävarmuutta.

Kasvihuonekaasujen aiheuttama ilmastonmuutos on erittäin monimutkainen ja monimuotoinen vaikutuskokonaisuus, josta ei vielä ole riittävästi tietoa kohtuullisten arvioiden tekemiseksi. Niinpä nyt esitetty arvio on luotettavuudeltaan hyvin epävarma. Lopputulos riippuu oleellisesti siitä, mitä laskentakorkoa käytetään. Tielikenteen ajonaikaisista ympäristökustannuksista 29 % arvioitiin aiheutuvan ilmastonmuutoksen vaikutuksista vuonna 1996. Tulos on hyvin herkkä pienillekin muutoksille käytettävässä yksikkökustannuksessa.

Taulukkoon 5-1 on koottu yhteenveto tulosten luotettavuudesta ja merkittävimmistä epävarmuustekijöistä. Useimpien vaikutusten kohdalla arvio perustuu tekijöiden subjektiiviseen käsitykseen, ei tarkkojen virherajojen laskentaan.

Taulukko 5-1 Yhteenveto tulosten luotettavuudesta (asteikko: erittäin heikko, heikko, kohtuullinen, hyvä, erittäin hyvä)

Vaikutus	Arvio luotettavuudesta	Merkittävimmät epävarmuustekijät
Terveysvaikutukset	kohtuullinen-hyvä	Altistus-vaikutusfunktiot, pitoisuus, yksikkökustannukset (oirekohtaisia eroja)
Materiaalihaitat, korroosio	hyvä	Arvioita ei ole tehty kaikille materiaaleille eikä epäpuhtauksille, materiaali-inventaario, pitoisuus
Materiaalihaitat, likaantuminen	kohtuullinen	Inventaario altistuvista kohteista, pitoisuus, yksikkökustannukset
Metsävauriot, happamoituminen	heikko	Altistus-vaikutusfunktiot, pitoisuus

Vaikutus	Arvio luotettavuudesta	Merkittävimmät epävarmuustekijät
Metsävauriot, otsoni	heikko	Altistus-vaikutusfunktiot, pitoisuus
Satovauriot	hyvä	Pitoisuus, arvioita ei ole tehty kaikille lajikkeille, arvioita ei ole tehty kaikille epäpuhtauksille
Ilmastomuutos	heikko	Mallin sisältämät epävarmuudet vaikuttavat yksikkökustannukseen

Infrastruktuurin tarvitseman sähköenergian hankinnan vaikutusten arviointiin liittyy samanlaisia epävarmuustekijöitä. Sähköntuotannon aiheuttamat pitoisuudet on arvioitu tutkimuksessa, jossa arvioitiin Suomen energiantuotannon ympäristökustannukset (Energia-Ekono 1998a). Suomen sähköntuotannon päästöt tunnetaan hyvin. Pitoisuuksien arviointiin liittyi samanlaisia epävarmuustekijöitä kuin tässä selvityksessä tehtyihin arvioihin tieliikenteen aiheuttamista pitoisuuksista. Pitoisuusarviot tehtiin arvioimalla vallitsevien epäpuhtauspitoisuuksien lähteet sektoreittain perustuen päästöjen alkupe-
rään (kaukokulkeuma, energiantuotanto, liikenne, teollisuus jne.). Energiantuotannon osalta käytettävissä oli mallinnustuloksia energiantuotannon aiheuttamista pitoisuuksista sekä pääkaupunkiseudulla että Tampereella, mikä paransi tehtyjen arvioiden luotettavuutta. Toisaalta tulosten yleistämiseen liittyy epävarmuutta. Vaikutusten ja kustannusten arviointiin liittyy samoja epävarmuustekijöitä kuin edellä on kuvattu tieliikenteen päästöjen osalta.

Polttoaineketjujen alkupään päästöjen aiheuttamien ympäristökustannusten arvioinnissa on käytetty polttoaineen käyttövaiheessa arvioituja yksikköhaittoja päästötonnia kohden (mk/t) haja-asutusalueilla. Täten saatu tulos on todennäköisesti arvio haitan ylärajasta. Tämä johtuu siitä, että suuri osa ketjun muiden kuin vaiheiden päästöistä syntyy asutuskustusten ulkopuolella esimerkiksi hiilikaivoksissa tai kuljetusten aikana merialueilla. Tällöin muiden kuin kasvihuonekaasujen kohdalla käytettävä yksikkökustannus yliarvioi haittaa, sillä juuri paikalliset terveysvaikutukset muodostavat ilmastomuutoksen jälkeen valtaosan haitoista. Lisäksi tulisi ottaa huomioon hintatason vaihtelu eri maissa, mikä vaikuttaa yksikkökustannusten suuruuteen. Ei ole kuitenkaan mitään erityistä perustetta tehdä arviota siitä, miten suuri osa haitoista tulisi jättää ottamatta huomioon, joten tässä on päädytty käyttämään samoja yksikköarvoja myös polttoaineketjujen alkupään päästöille.

Suomessa syntyvistä päästöistä merkittävä osa kulkeutuu Suomen rajojen ulkopuolelle. Myös näiden päästöjen ympäristökustannusten arvioinnissa on käytetty polttoaineen käyttövaiheessa arvioituja yksikköhaittoja päästötonnia kohden (mk/t) haja-asutusalueilla. Suuri osa päästöistä kulkeutuu harvaanasutuille alueille Suomen itä- ja pohjoispuolella. Myös näitä haittoja arvioitaessa tulisi ottaa huomioon hintatason vaihtelu eri maissa, mikä vaikuttaa yksikkökustannusten suuruuteen. Nämä tekijät johtavat siihen että käytetyt yksikköhaitat saattavat olla yläarvioita. Toisaalta suuri osa rikki- ja typpipäästöistä kulkeutuu sulfaatiksi ja nitraatiksi muuntuneena ja ne ovat terveysvaikutusten kannalta haitallisempia kuin rikkidioksidi ja typen oksidit. Tämä puolestaan antaisi aiheutta tarkastaa yksikköhaittoja ylöspäin.

Myös arvioitujen haittojen oikeudenmukaiseen kohdistamiseen eri ajoneuvotyypeille ja polttoaineen käytölle liittyy epävarmuutta. Merkittävin epävarmuustekijä on resuspensiosta aiheutuvan likaantumishaitan kohdistaminen. Oikeudenmukainen jako ottaisi huomioon mm. ajoneuvojen massan ja nopeuden. Aiheesta ei 20le tehty selvityksiä, joten perustarkastelussa haitta-arviot on kohdistettu eri ajoneuvoille suoraan suhteessa niiden suoritteeseen.

5.2 Herkkyystarkastelu

Seuraavassa arvioidaan numeerisesti tuloksiin sisältyvää epävarmuutta. Kappaleissa 5.2.1 - 5.2.8 tarkastellaan liikennepolttoaineiden käytön ja kappaleessa 5.2.9 keskitytään tieinfrastruktuurin sähkönhankinnan ympäristökustannusten arvottamisen epävarmuustekijöihin. Lopuksi kappaleessa 5.2.10 esitetään yhteenveto herkkyystarkastelun tuloksista.

5.2.1 Kuolleisuusriski

Tässä selvityksessä kuolleisuusriskiä on arvioitu ExternE-projektissa suositelluilla altistus-vaikutusfunktioilla ja yksikkökustannuksilla. ExternE:ssä eri terveysvaikutukset luokiteltiin kolmeen epävarmuusryhmään: A (korkea luotettavuus), B (keskinkertainen luotettavuus) tai C (heikko luotettavuus). Geometrinen standardikeskihajonta, joka huomioi arvottamisen kaikissa vaiheissa syntyvän epävarmuuden yhteensä, vaihteli luokittain ollen A:ssa 2,5 - 4, B:ssä 4 - 6 ja C:ssä 6 - 12. Kuolleisuusriskin arvioinnissa tulokset kuuluivat luokkaan B.

Arvioksi tieliikenteen aiheuttamasta kuolleisuusriskistä saatiin noin 4 264 milj. mk vuodessa. Käyttäen geometrisenä keskihajontana arvoa viisi saadaan 68 % luottamusvälillä matala arvio jakamalla todennäköinen arvio viidellä ja korkea arvio kertomalla se viidellä. Tällöin matalaksi arvioksi haitasta saadaan noin 853 milj. mk vuodessa ja korkeaksi arvioksi noin 21 318 milj. mk vuodessa.

Seuraavassa on esitetty toinen herkkyystarkastelu, jossa käytetyt muuttujat on esitetty taulukossa 5-2. Pitoisuuksien osalta tarkastellaan tilannetta, joissa altistuspitoisuudet olisivat puolet arvioiduista (taulukko 3-1) tai 50 % korkeammat. Altistus-vaikutusfunktioiden osalta matala arvio on suoritettu olettamalla altistus-vaikutusyhteys 50 % vähäisemmäksi kuin käytetyssä arviossa. Korkea arvio on suoritettu käyttämällä kroonisen kuolleisuuden osalta Pope ym. (1995) raportoimia alkuperäisiä altistus-vaikutusfunktioita ja akuutin kuolleisuuden osalta olettamalla altistus-vaikutusyhteys kaksinkertaiseksi. Yksikkökustannusten matala ja korkea arvio on myös otettu ExternE:stä (Euroopan komissio 1997a). Taulukossa 5-3 on esitetty näillä oletuksilla saatu korkea ja matala arvio sekä perustarkasteluissa käytetty arvio.

Taulukko 5-2 Kuolleisuusriskin herkkyystarkastelussa käytettävät lähtöoletukset

Muuttuja	Matala arvio	Käytetty arvio	Korkea arvio
Pitoisuudet	- 50 %	Ks taulukko 3-1	+ 50 %
Altistuva väestö	Sama kuin käytetyssä arviossa	Ks. taulukko 4-1	Sama kuin käytetyssä arviossa
Altistus-vaikutusfunktiot	- 50 %	Ks. taulukko 4-2	+ 100 %
Yksikkökustannukset/mk	YOLL 347 000 tapaus 422 000	YOLL 485 000 tapaus 668 000	YOLL 563 000 tapaus 1 344 000

Taulukko 5-3 Tieliikenteen päästöistä johtuvan kuolleisuuden aiheuttama haitta, milj. mk/a (1997 rahassa)

	Matala arvio	Käytetty arvio	Korkea arvio
Taajamat	183	2 057	7 319
Haja-asutusalueet	11	123	522
Yhteensä	194	2 179	7 842

On epätodennäköistä, että kaikki matalaan tai korkeaan arvioon johtavat oletukset toteutuvat samanaikaisesti. Esimerkiksi pelkän pitoisuuden varioiminen taulukon 5-2 mukaisesti johtaa matalaan arvioon 1 090 milj. mk vuodessa ja korkeaan arvioon 3 269 milj. mk vuodessa.

5.2.2 Sairastuvuusriski

Tässä selvityksessä sairastuvuusriskiä on arvioitu ExternE-projektissa suositelluilla altistus-vaikutusfunktioilla. Yksikkökustannuksina on käytetty osittain suomalaisessa contingent valuation -tutkimuksessa muodostettuja ja osittain ExternE:ssä käytettyjä yksikkökustannuksia. ExternE:ssä luokiteltiin arviot eri terveysvaikutusten kustannuksista kolmeen epävarmuusryhmään: A (korkea luotettavuus), B (keskinkertainen luotettavuus) tai C (heikko luotettavuus). Geometrinen standardikeskihajonta, joka huomioi arvottamisen kaikissa vaiheissa syntyvän epävarmuuden yhteensä, vaihteli luokittain ollen A:ssa 2,5 - 4, B:ssä 4 - 6 ja C:ssä 6 - 12. Kaikki arviot terveysvaikutuksista luokiteltiin ryhmään A tai B.

Arvioksi tieliikenteen aiheuttamasta sairastuvuusriskistä saatiin noin 794 milj. mk vuodessa. Käyttäen kunkin vaikutuksen geometristä keskihajontaa saadaan 68 % luotamustasolla matala arvio jakamalla todennäköinen arvio jakamalla ja korkea arvio kertomalla se geometrisellä keskihajonnalla. Kun luokassa A käytetään kolmea ja luokassa B viittä geometrisenä keskihajontana, saadaan matalaksi arvioksi haitasta noin 226 milj. mk vuodessa ja korkeaksi arvioksi noin 2 971 milj. mk vuodessa.

Seuraavassa on esitetty toinen herkkyystarkastelu, jossa käytetyt muuttujat on esitetty taulukossa 5-4. Pitoisuuden osalta tarkastellaan tilannetta, joissa olisivat puolet arvioituista (taulukko 3-1) tai 50 % korkeammat. Altistus-vaikutusfunktioiden osalta matala

ja korkea arvio on suoritettu ExternE:ssä (Euroopan komissio 1995) raportoituihin funktioihin liittyvien keskimääräisten epävarmuuksien mukaan.

Sairastuvuutta arvioitaessa merkittävimpiä oireita ovat hiukkasten aiheuttamat rajoittuneen toimintakyvyn päivät (RAD) ja uudet krooniset keuhkoputkentulehdustapaukset sekä otsonin aiheuttama oireilu. Näistä krooniselle keuhkoputkentulehdukselle käytetty yksikköarvo on otettu ExternE:stä, mutta muille on käytetty suomalaisessa contingent valuation -tutkimuksessa (Energia-Ekono 1998b) muodostettuja yksikköarvoja. Kroonisen keuhkoputkentulehduksen yksikköarvona käytettiin perustarkastelussa 600 000 mk, vaihteluvälin ollessa 360 000 - 965 000 mk. Suomalaisessa tutkimuksessa yksikköarvoille muodostettiin virherajat. RAD:n yksikköarvon vaihteluväliksi saatiin 215 - 1 084 mk todennäköisen arvon ollessa 568 mk ja oireilupäivien vaihteluväliksi 44 - 219 mk todennäköisen arvon ollessa 97 mk. Muille oireille käytettiin vaihteluvälinä 30 % perustarkastelussa käytettyä alhaisempaa ja korkeampaa yksikköarvoa.

Taulukossa 5-5 on esitetty näillä oletuksilla saatu korkea ja matala arvio sekä perustarkasteluissa käytetty arvio.

Taulukko 5-4 Sairastuvuusriskin herkkyystarkastelussa käytettävät lähtöoletukset

Muuttuja	Matala arvio	Käytetty arvio	Korkea arvio
Pitoisuudet	- 50 %	Ks taulukko 3-1	+ 50 %
Altistuva väestö	Sama kuin käytetyssä arviossa	Ks. taulukko 4-1	Sama kuin käytetyssä arviossa
Altistus-vaikutusfunktiot	- 30 %	Ks. taulukko 4-6	+ 30 %
Yksikkökustannukset	Ks. teksti	Ks. taulukko 4-6	Ks. teksti

Taulukko 5-5 Tieliikenteestä johtuvan sairastuvuuden aiheuttama haitta, milj. mk/a (1997 rahassa)

	Matala arvio	Käytetty arvio	Korkea arvio
Taajamat	69	727	2 374
Haja-asutusalueet	6	67	259
Yhteensä	74	794	2 633

On epätodennäköistä, että kaikki matalaan tai korkeaan arvioon johtavat oletukset toteutuvat samanaikaisesti. Esimerkiksi pelkän pitoisuuden varioiminen taulukon 5-4 mukaisesti johtaa matalaan arvioon 397 milj. mk vuodessa ja korkeaan arvioon 1 192 milj. mk vuodessa.

5.2.3 Rakennusmateriaalien rapautuminen

Rakennusmateriaalivaurioita arvioitaessa epävarmuustekijöitä ovat a) käytetyt yksikkökustannukset, b) arvio materiaalmääristä (riippuu väestömääristä) sekä c) altistuspitoisuudet. Tässä selvityksessä haitat on arvioitu neljälletoista erilaiselle materiaalille, mutta ulkoilmalle altistuvia erilaisia materiaaleja on enemmän. Tämä johtaa haitan aliarvioin-

tiin, mutta tätä tekijää ei ole ollut mahdollista ottaa tässä herkkyystarkastelussa mukaan. Toinen haittojen aliarvioimiseen johtava tekijä on se, että haitta-arviot on voitu esittää vain rikkidioksidin aiheuttamille materiaalivaurioille, mutta myös muut ilman epäpuh-
taudet aiheuttavat materiaalien syöpymistä.

Herkkyystarkastelu on esitetty taulukossa 5-7 perustuen taulukossa 5-6 esitettyihin oletuksiin.

Taulukko 5-6 Rikkidioksidin aiheuttamien materiaalivaurioiden herkkyystarkastelussa käytettävät lähtöoletukset

Muuttuja	Matala arvio	Käytetty arvio	Korkea arvio
Yksikkökustannus	- 20 %	Ks. taulukko 4-10	+ 20 %
Päästöille altistuva väestö/materiaalit	- 50 %	Koko väestö	Koko väestö
Pitoisuus	- 50 %	Taajamat 0,5 µg/m ³ Haja-as. 0,05 µg/m ³	+ 50 %

Taulukko 5-7 Tieliikenteestä johtuvien materiaalivaurioiden aiheuttama haitta, milj. mk/a (1997 rahassa)

	Matala arvio	Käytetty arvio	Korkea arvio
Taajamat	2,4	12,1	21,7
Haja-asutusalueet	0,08	0,4	0,7
Yhteensä	2,5	12,5	22,4

On epätodennäköistä, että kaikki matalaan tai korkeaan arvioon johtavat oletukset toteutuvat samanaikaisesti.

5.2.4 Likaantumisen

Likaantumishaittaa arvioitaessa epävarmuustekijöitä ovat a) käytetty yksikkökustannus, b) altistuvat väestömäärät, joista altistuvien kohteiden määrän katsotaan riippuvan sekä c) altistuspitoisuudet. Haitta-arvio riippuu näistä kustakin muuttujasta lineaarisesti.

Taulukossa 5-9 esitetään likaantumishaitan ympäristökustannuksille luvussa 4.4 esitetyn keskimmäisen arvion lisäksi matala ja korkea arvio. Arviot perustuvat seuraavan taulukon 5-8 mukaisiin oletuksiin. Tuloksia tarkasteltaessa on otettava huomioon, että on epätodennäköistä, että kaikki matalaan tai korkeaan arvioon johtavat oletukset toteutuvat samanaikaisesti.

Taulukko 5-8 Likaantumishaitan herkkyystarkastelussa käytettävät lähtöoletukset

Muuttuja	Matala arvio	Käytetty arvio	Korkea arvio
Yksikkökustannus	- 50 %	5,75 mk per 1 µg/m ³ per henkilö	+ 100 %
Päästöille altistuva väestö	- 50 %	Koko väestö	Koko väestö
Resuspensiolle altistuva väestö	- 50 %	taajamat 825 000 haja-as. 55 000	Koko väestö
Pitoisuudet	- 50 %	Ks. taulukko 4-12 Ks. taulukko 4-12	+ 50 %

Taulukko 5-9 Tieliikenteen aiheuttama likaantumishaitta, milj. mk/a (1997 rahassa)

	Matala arvio	Käytetty arvio	Korkea arvio
Taajamat	23,6	188,6	1 891
Haja-asutusalueet	0,6	4,6	95
Yhteensä	24,2	193	1 986

5.2.5 Happamoittavan laskeuman aiheuttamat metsävauriot

Happamoittavan laskeuman aiheuttamien metsävaurioiden arvioinnissa epävarmuustekijöitä ovat a) altistus-vaikutusfunktio ja b) tieliikenteen osuuden arviointi happamoittavan laskeuman aiheuttamista kokonaisvaurioista sekä c) käytettävä laskentakorko. Eri puulajien määrä ja vuotuinen kasvu ovat hyvin tiedossa ja yksikkökustannuksina on käytetty markkinahintoja.

Taulukossa 5-10 on esitetty herkkyystarkastelussa käytetyt oletukset sekä muuttujia varioimalla saadut arviot haitasta. Tuloksia tarkasteltaessa on otettava huomioon, että on epätodennäköistä, että kaikki matalaan tai korkeaan arvioon johtavat oletukset toteutuvat samanaikaisesti.

Taulukko 5-10 Tieliikenteestä johtuvan happamoittavan laskeuman aiheuttamien metsävaurioiden haitan herkkyystarkastelussa käytetyt lähtöoletukset ja arvio haitasta, milj. mk/a (1997 rahassa)

	Matala arvio	Käytetty arvio	Korkea arvio
Altistus-vaikutusfunktio	- 50 %	Ks. luku 4.5	+ 100 %
Tieliikenteen osuus happamoittavista päästöistä	- 30 %	Ks. luku 4.5	+ 30 %
Haitta, milj. mk/a	3,1	8,7	21,9

Myös pelkän laskentakoron varioiminen muuttaa arviota. Perustarkastelussa on käytetty laskentakorkoa 1 %. Jos muut perustarkastelussa käytetyt oletukset pidettäisiin voimassa, mutta laskentakorko olisi 0 %, olisi haitta-arvio 10,4 milj. mk vuodessa. Kolmen prosentin laskentakorolla haitta-arvioksi saataisiin 5,8 milj. mk vuodessa. Laskentakorko vaikuttaa kuitenkin haitta-arvioon vähemmän kuin muut oletukset ja yhden prosentin laskentakorko on kuitenkin varsin perusteltu haitan pitkäaikaisen luonteen ja sukupolvi-tasa-arvoisuuden periaatteen perusteella. Tämän vuoksi laskentakorko on jätetty pois taulukossa 5-10 esitetystä herkkyystarkastelusta.

5.2.6 Otsonin aiheuttamat metsävauriot

Otsonin aiheuttamien metsävaurioiden arvioinnissa epävarmuustekijöitä ovat a) altistusvaikutusfunktiot ja b) tieliikenteen osuuden arviointi otsonin aiheuttamista kokonaisvaurioista sekä c) tarkastelun aikajänne. Eri puulajien määrä ja vuotuinen kasvu ovat hyvin tiedossa ja yksikkökustannuksina on käytetty markkinahintoja.

Käytetty altistus-vaikutusfunktio on luonteeltaan hyvin alustava, joten siihen sisältyy merkittävä virhemahdollisuus. Myös eri puulajeille on jouduttu käyttämään samaa altistus-vaikutusfunktiota. Tieliikenteen osuuden arviointi otsonin aiheuttamista kokonaisvaurioista on jossain määrin epävarmaa, sillä käytettävissä ei ole ollut otsonimallia, vaan vaikutus otsonin muodostukseen on arvioitu suhteessa eri lähteistä syntyviin otsonia muodostaviin päästöihin. Haitta on myös arvioitu yksivuotisena, vaikka metsävaurioiden kohdalla haitta on todennäköisesti kumuloituva toisin kuin yksivuotisten viljelykasvien kohdalla. Tämä johtaa haitan aliarviointiin.

Taulukossa 5-11 on esitetty herkkyystarkastelussa käytetyt lähtöoletukset sekä muuttujia varioimalla saadut arviot haitasta. Tuloksia tarkasteltaessa on otettava huomioon, että on epätodennäköistä, että kaikki matalaan tai korkeaan arvioon johtavat oletukset toteutuvat samanaikaisesti.

Taulukko 5-11 Tieliikenteestä johtuvien otsonipitoisuuksien aiheuttamien metsävaurioiden haitan herkkyystarkastelussa käytetyt lähtöoletukset ja arvio haitasta, milj. mk/a (1997 rahassa)

	Matala arvio	Käytetty arvio	Korkea arvio
Altistus-vaikutusfunktio	- 50 %	Ks. luku 4.6	+ 100 %
Tieliikenteen osuus O ₃ muodostavista päästöistä	- 30 %	16 % kotimaiset lähteet 49 % NO _x ja 13 % VOC tieliikenteestä	+ 30 %
Haitta, milj. mk/a	11,9	34,1	88,6

5.2.7 Viljelykasvivauriot

Otsonin maanviljelykselle aiheuttamaa haittaa arvioitaessa merkittävimpiä epävarmuustekijöitä ovat a) otsonipitoisuus ja otsonin taustapitoisuus, b) altistusvaikutusfunktiot sekä c) arvio tieliikenteen osuudesta otsonin muodostumisessa. Vähäisempiä epävarmuuden lähteitä ovat inventaario altistuvista sadoista sekä yksikköhinnat.

Yksikköhintoina on ruokaviljojen osalta käytetty tuottajahintoja EU:n alueella ja rehujen osalta tuotantokustannuksia. Lisäksi kaikille lajikkeille ei ole laadittu altistusvaikutusfunktioita, mikä johtaa haittojen aliarvioimiseen. Huomiotta jätettyjä lajeja ovat mm. sokerijuurikas, öljykasvit, vihannekset, hedelmät ja marjat.

Taulukossa 5-13 esitetään satotappioiden ympäristökustannuksille luvussa 4.7 esitetyn perustarkastelun lisäksi matala ja korkea arvio. Arviot perustuvat taulukon 5-12 mukaisiin oletuksiin. Taulukossa 4-17 esitetty vaihteluväli otsonin aiheuttamien satovaurioiden kustannuksista pitää sisällään vain altistusvaikutusfunktioiden sisältämän epävarmuuden. Tuloksia tarkasteltaessa on otettava huomioon, että on epätodennäköistä, että kaikki matalaan tai korkeaan arvioon johtavat oletukset toteutuvat samanaikaisesti.

Taulukko 5-12 Otsonin aiheuttamien satotappioiden herkkyystarkastelussa käytettävät lähtöoletukset

Muuttuja	Matala arvio	Käytetty arvio	Korkea arvio
Pitoisuus	- 50 %	72,6 µg/m ³ eli 36,3 ppb	+ 100 %
Altistus-vaikutusfunktiot	Ks. taulukko 4-15	Ks. taulukko 4-15	Ks. taulukko 4-15
Tieliikenteen osuus O ₃ muodostavista päästöistä	- 30 %	16 % kotimaiset lähteet 49 % NO _x ja 13 % VOC tieliikenteestä	+ 30 %

Taulukko 5-13 Tieliikenteestä johtuvien otsonipitoisuuksien aiheuttamat satotappiot, milj. mk/a (1997 rahassa)

	Matala arvio	Käytetty arvio	Korkea arvio
Syysvehnä	0,01	0,17	2,23
Kevätvehnä	0,11	1,31	5,51
Syysruis	0,02	0,34	3,59
Ohra	0,11	1,31	5,54
Kaura	0,43	4,13	58,1
Peruna	0,42	5,14	21,7
Kuivaheinä	0,70	9,76	68,6
Säilörehu	0,14	1,92	13,5
Yhteensä	1,9	24,1	179

5.2.8 Ilmastonmuutos

Arvio haitasta perustui ExternE:ssä käytetyn FUND-mallin tuloksiin (Euroopan komissio 1997a ja 1997b). Malli sisälsi seuraavat ilmastonmuutoksen vaikutukset: terveys, maanviljely, vesihuolto, merenpinnan nousu, ekosysteemit ja biodiversiteetti sekä katastrofit (tulvat, myrskyt yms.). Mallia sovellettiin IPPC:n esittämiin skenaarioihin.

Tieliikenteelle tehdyssä selvityksessä (Tielaitoksen toimeksiannosta Energia-Ekono 1997) hiilidioksiditonnille käytettiin yksikköarvoa 166 mk (1990 rahassa). Tähän oli päästy soveltamalla Fankhauserin (1994) kehittämää mallia käyttäen kuitenkin laskentakorkona 3 % (Maddison 1994). Tielaitokselle tehdyssä selvityksessä käytetty eri tutkimuksiin perustuva yksikköarvo on lähes sama kuin tässä selvityksessä käytetty, kun otetaan huomioon kustannustason muutos vuodesta 1990 vuoteen 1997.

Eräs lähestymistapa päästöjen arvottamiseen ovat taloudelliset ohjauskeinot. Ne heijastelevat yhteiskunnan maksuhalukkuutta välttää tiettyjä päästöjä. Hiilidioksiditoimikunta I:n mietinnössä (Komiteamietintö 1991:21) todetaan, että 150 markan vero hiilidioksiditonnilta saattaisi riittää pysäyttämään hiilidioksidipäästöjen kasvun.

Taulukossa 5-14 on esitetty FUND-mallin tuottamat hiilidioksidipäästöjen yksikköarvot, jotka on saatu laskentakorkoa varioimalla. Samoja yksikköarvoja on käytetty myös muiden kasvihuonekaasujen vaikutuksen arvottamiseen, sillä ne on muutettu CO₂-ekvivalenteiksi. Laskentakorko on tuloksiin merkittävimmin vaikuttava muuttuja. Eri yksikköarvoin saadut haitta-arviot on esitetty taulukossa 5-15.

Taulukko 5-14 Ilmastonmuutoksen yksikkökustannusten vaihteluväli FUND-mallissa (perustarkastelussa käytetty yksikköarvo varjostettu)

	Matala arvio	Keskiarvo	Korkea arvio
	- mk/tonni CO ₂ -ekvivalenttia -		
95 % luottamusväli	23 (i = 5 %)	427	830 (i = 3 %)
Suppeampi luottamusväli	108 (i = 3 %)	191	275 (i = 1 %)

Taulukko 5-15 Tieliikenteen aiheuttaman ilmastonmuutoksen vaihteluväli FUND-mallin yksikköarvoin (perustarkasteluun sisällytetty haitta-arvio varjostettu, haitta-arvio sisältää myös metaanin ja typpioksiduulin), milj. mk/a (1997 rahassa)

	Matala arvio	Keskiarvo	Korkea arvio
	- milj. mk / a -		
95 % luottamusväli	264	4 963	9 662
Suppeampi luottamusväli	1 251	2 224	3 197

5.2.9 Työkoneiden päästöt

Työkoneiden päästöjen epävarmuutta tarkasteltaessa epävarmuustekijöinä ovat 1) työkoneiden päästöt ja 2) arvottamisessa käytetty yksikkökustannus. Perustarkastelussa käytetty haitta-arvio on 0,7 milj. mk. Yksikkökustannuksena sekä diesel- että polttoöljykäyttöisille työkoneille on käytetty dieselkäyttöisille ajoneuvoille arvioitua yksikkökustannusta 2,02 mk/litra. Tämä yksikköarvon käyttöön liittyy oletus, että työkoneiden ominaispäästöt ovat samat kuin Suomen keskimääräisen ajoneuvokannan. Tämä on karkea oletus, joka todennäköisesti aliarvioi haittaa.

Koko tieliikenteen ajonaikaisten vaikutusten haitan matala arvio on 1 563 milj. mk, käytetty arvio 5 471 milj. mk ja korkea arvio 15 970 milj. mk. Oletetaan, että työkoneiden päästöjen haitta-arvio on verrannollinen näihin haittoihin. Tällöin matalaksi arvioksi saadaan 0,2 milj. mk ja korkeaksi arvioksi 2,0 milj. mk.

5.2.10 Sähkön hankinta

Sähkön hankinnan haitta-arvioiden epävarmuutta tarkasteltaessa epävarmuustekijöinä ovat kaikki taulukossa 5-1 esitetyt, mutta merkittävimpiä näistä ovat terveysvaikutusten ja ilmastonmuutoksen vaikutusten arviointiin liittyvät epävarmuudet. Lähdetutkimuksessa (Energia Ekono Oy 1998c) sähkön hankinnan keskimmäisen arvion 5,4 p/kWh tuotettua sähköä (ilman häviöitä) lisäksi matala arvio 2,8 p/kWh ja korkea arvio 10 p/kWh. Kun häviöt otetaan huomioon, kasvattaa tämä yksikkökustannuksia 1,5 %. Kun keskimmainen yksikköarvo tuottaa arvioksi tieinfrastruktuurin sähkönkäytön haittoista 5,5 milj. mk vuodessa, on matala arvio 2,8 milj. mk vuodessa ja korkea arvio 10 milj. mk vuodessa.

5.2.11 Polttoaineketjut

Polttoaineketjujen haittojen epävarmuuden tarkastelussa epävarmuustekijöitä ovat sekä 1) päästömäärät että käytetyt 2) yksikkökustannukset. Suoritetaan karkea herkkyystarkastelu, jossa varioidaan vain yksikkökustannuksia. Perustarkastelussa käytetyssä arviossa yksikkökustannuksina on käytetty Suomen haja-asutusalueilla arvioituja yksikkökustannuksia.

Matala arvio suoritetaan olettamalla haitan olevan verrannollinen tieliikenteen ajonaikaisten vaikutusten haittaan, jonka matala arvio on 1 563 milj. mk ja käytetty arvio 5 471 milj. mk. Tällöin matalaksi arvioksi haitasta saadaan 13 milj. mk. Korkea arvio suoritetaan käyttämällä Suomessa vaikuttaville päästöille arvioituja keskimääräisiä yksikkökustannuksia (mk/t). Tällöin korkeaksi arvioksi haitasta saadaan 234 milj. mk.

5.2.12 Päästöjen haitat ulkomaille

Ulkomaille kulkeutuvien päästöjen haittojen epävarmuuden tarkastelussa epävarmuustekijöitä ovat sekä 1) ulkomaille kulkeutuvat päästömäärät että käytetyt 2) yksikkökustannukset. Päästöjen kulkeutuminen on arvioitu vain rikin, typen ja hiukkasten osalta. Hiilivetyjen ja hiilimonoksidin kulkeutumista ei ole arvioitu. Suoritetaan karkea herkkyystarkastelu, jossa varioidaan vain yksikkökustannuksia. Perustarkastelussa käytetyssä arviossa yksikkökustannuksina on käytetty Suomen haja-asutusalueilla arvioituja yksikkökustannuksia.

Matala arvio suoritetaan olettamalla haitan olevan verrannollinen tieliikenteen ajonaikaisten vaikutusten haittaan, jonka matala arvio on 1 563 milj. mk ja käytetty arvio 5 471 milj. mk. Tällöin matalaksi arvioksi haitasta saadaan 99 milj. mk. Korkea arvio suoritetaan käyttämällä Suomessa vaikuttaville päästöille arvioituja keskimääräisiä yksikkökustannuksia (mk/t). Tällöin korkeaksi arvioksi haitasta saadaan 2 159 milj. mk.

5.2.13 Haitan jako suoritteille

Haitta-arvion jakaminen suoritteille sisältää epävarmuutta lähinnä resuspension osalta. Perustarkastelussa haitta-arvio on kohdistettu tasaisesti eri ajoneuvotyypeille suoraan suhteessa niiden suoritteeseen. Tällöin haitta-arvioksi saadaan taajamissa 0,57 p/ajoneuvo-km, haja-asutusalueilla 0,006 p/ajoneuvo-km ja keskimäärin 0,28 p/ajoneuvo-km kaikille ajoneuvotyypeille. Tämä jakotapa yliarvioi kevyempien ajoneuvojen haittaa ja aliarvioi raskaampien ajoneuvojen haittaa.

Suoritetaan tarkastelu, jossa oletetaan raskaiden ajoneuvojen (linja-autot ja kuorma-autot) vaikutus resuspensioon kolminkertaiseksi keveämpiin ajoneuvoihin nähden. Tällöin kevyiden ajoneuvojen haitta-arvioksi saadaan taajamissa 0,47 p/ajoneuvo-km, haja-asutusalueilla 0,005 p/ajoneuvo-km ja keskimäärin 0,23 p/ajoneuvo-km. Raskaiden ajoneuvojen haitta-arvioksi saadaan taajamissa 1,71 p/ajoneuvo-km, haja-asutusalueilla 0,02 p/ajoneuvo-km ja keskimäärin 0,85 p/ajoneuvo-km. Vaikutus suoritteille kohdistettuun kokonaishaittaan on täten hyvin pieni.

5.2.14 Yhteenvedo herkkyystarkastelun tuloksista

Tehtyjä matalia ja korkeita arvioita tarkasteltaessa on otettava huomioon, ettei ole todennäköistä, että kaikki näihin johtavat oletukset toteutuisivat samanaikaisesti. On myös epätodennäköistä että eri vaikutusten haitta-arvioita vertailtaessa näistä säännönmukaisesti toteutuisi matala tai korkea arvio. Matemaattisesti tällainen virhe voitaisiin välttää, mikäli kaikille erilaisille virheiden lähteille olisi tiedossa geometrinen keskihajonta. Näitä matemaattisella kaavalla yhdistelemällä olisi mahdollista päästä tarkempaan arvioon haitan ala- ja ylärajasta. Tällaiseen tarkasteluun ei ole kuitenkaan päästy, sillä keskihajonnat eivät ole tiedossa kaikkien virhelähteiden osalta.

Saadut tulokset osoittavat kuitenkin haitta-arvion todennäköistä vaihteluväliä. Tämän selvityksen perustarkastelussa on epävarmoissa tilanteissa valittu käyttöön useimmiten varovainen arvio tarkasteltavista muuttujista. Perustutkimuksen edistyessä haitta-arvioihin on todennäköisesti mahdollista ottaa mukaan lisää erilaisia vaikutuksia, joiden kustannuksia tässä ei vielä ole ollut mahdollista arvioida riittävän luotettavien altistusvaikutusfunktioiden puuttuessa. Näin tulee todennäköisesti tapahtumaan erityisesti terveysvaikutusten osalta. Erityisen kiinnostavaa suomalaisesta näkökulmasta on, millaisia arvioita happamoitumisen ja otsonin aiheuttamille metsävaurioille jatkossa voidaan suorittaa. Sen sijaan ilmastomuutoksen vaikutusten kustannusarvioiden kehittymisen suunnasta on vielä tässä vaiheessa hyvin hankala tehdä päätelmiä.

Taulukko 5-16 Yhteenvedo tieliikenteen haitta-arvioihin liittyvästä epävarmuudesta, milj. mk/a (1997 rahassa)

	Matala arvio	Käytetty arvio	Korkea arvio
Kuolleisuus	194	2 179	7 842
Sairastuvuus	74	794	2 633
Materiaalien rapautuminen	2,5	12,5	22,4
Likaantuminen	24	193	1 986
Metsien happamoituminen	3,1	8,7	22
Metsien otsonivauriot	12	34	89
Viljelykasvivauriot	1,9	24	179
Ilmastonmuutos	1 251	2 224	3 197
Yhteensä, milj. mk/a	1 563	5 471	15 970
Työkoneiden päästöt	0,2	0,7	2,0
Infrastruktuurin sähkönhankinta	2,8	5,5	10
Polttoaineketjut	13	44	234
Haitat ulkomailla	99	346	2 159
Yhteensä, milj. mk/a	1 678	5 867	18 375

6. VERTAILUA AIEMPIEN SELVITYSTEN TULOKSIIN

Selvityksiä Suomen tieliikenteen päästöjen ympäristökustannuksista on tehty kolme:

- Tieliikenteen päästöjen haittojen kustannukset. Tiehallituksen sisäisiä julkaisuja 3/1992. Tielaitoksen toimeksiannosta Ekono 1992.
- Tieliikenteen polttoaineperäisten päästöjen vaikutusten arvottaminen. MOBILE-tutkimusohjelma. Energia-Ekono Oy 1994.
- Tieliikenteen päästöjen vaikutusten arvottaminen. Tielaitoksen selvityksiä 9/1997. Tielaitoksen toimeksiannosta Energia-Ekono Oy 1997.

Taulukkoon 6-1 on koottu eri selvityksissä saadut arviot haitasta. Esitetyt haitta-arviot poikkeavat tässä selvityksessä esitetyistä. Vuonna 1997 julkaistun raportin ja tämän selvityksen välisiä eroja on käsitelty luvussa 1.1. Tehtyjen arvioiden perusteissa on tähän selvitykseen nähden paljon muutoksia ja erot lisääntyvät vanhempiin selvityksiin verrattuna. Kaikissa selvityksissä on käytetty pääasiallisena arvottamismenetelmänä vaikutuspolkumenetelmää. Muutoksia on tapahtunut arvotettavissa vaikutuksissa ja päästökomponenteissa, altistus-vaikutusfunktioissa, yksikkökustannuksissa, laskentakorossa ja haittojen kohdistamisessa eri päästökomponenteille.

Vuosina 1992 - 1997 tehdyt arviot perustuvat vuoden 1990 päästöihin ja tämän selvityksen arviot vuoden 1996 päästöihin. Päästömäärissä on tapahtunut muutoksia niin teknisen kehityksen kuin liikennesuoritteissa tapahtuneiden muutosten vuoksi. Liikenteen lyijypäästöt ovat väistynyt ilmansuojeluongelma. Rikkidioksidipäästöt ovat 22 %, hiukaspäästöt 67 %, hiilimonoksidipäästöt noin 73 %, hiilivety- ja typen oksidien päästöt noin 80 % ja hiilidioksidipäästöt noin 92 % vuoden 1990 päästötasosta. Samanaikaisesti liikennesuorite on kasvanut 39,8 miljardista 42,5 miljardiin kilometriin vuodessa.

Vuoden 1992 selvityksessä metsävaurioiden haittojen arvioinnissa sovellettiin eri altistus-vaikutusfunktioita ja laskentakorkona käytettiin 0 %. Arvio ilmastonmuutoksen haittoista perustui niihin taloudellisiin ohjauskeinoihin, joiden oletettiin johtavan hiilidioksidipäästöjen kasvun pysähtymiseen. Vuoden 1994 selvityksessä on käytetty laskentakorkona 3 %. Vuoden 1997 selvityksessä laskentakorkona on käytetty 3 %. Tässä selvityksessä laskentakorkona on käytetty metsävaurioille 1 % ja ilmastonmuutoksen haitat on arvioitu 1 % ja 3 % laskentakoroilla muodostettujen yksikköarvojen keskiarvolla. Alhaisempaa laskentakorkoa voi perustella mm. sukupolvien välisen oikeudenmukaisuuden perusteella.

Sulfaatin ja nitraatin haitat voidaan käsitellä joko hiukkasten aiheuttamina haittoina tai kohdistaa ne rikki- ja typpipäästöille. Tässä ja vuoden 1997 selvityksessä ne on kohdistettu rikki- ja typpipäästöille, mutta aiemmissa selvityksissä niiden aiheuttamat haitat on laskettu yhteen hiukaspäästöjen haittojen kanssa. Myös otsonin haittoja voidaan käsitellä joko kokonaisuutena tai kohdistaa ne typpi- ja hiilivety-päästöille. Tässä selvityksessä, kuten myös vuoden 1997 tutkimuksessa, otsonin aiheuttamat haitat on muissa yhteyksissä kohdistettu typpi- ja hiilivety-päästöille, mutta tässä ne on vertailtavuuden vuoksi esitetty otsonin kohdalla.

Taulukko 6-1 Arvioita Suomen tieliikenteen päästöjen ympäristökustannuksista, milj. mk/a (vuoden 1992 tulokset 1989 rahassa, vuosien 1994 ja 1997 tulokset 1990 rahassa ja tämän selvityksen tulokset 1997 rahassa)

Vaikutuksen kohde	Tutkimus ¹	SO ₂	NO _x	Hiukaset ⁴	CO	HC	Pb	Ghg	O ₃	Resuspensio	Yhteensä
Terveys	1992	9,7	68	160	-	32	-	-	-	- ³	260
	1994	7	-	1 519	-	1 137	46	-	-	- ³	2 709
	1997	35	144	833	-	478	46	-	-	500	2 036
	1999	44	378	2 448	32	O ₃ ²	-	-	72	- ³	2 974
Materiaalit	1992	15	21	410	-	-	-	-	-	-	450
	1994	14	-	62	-	-	-	-	-	-	76
	1997	18	-	62	-	-	-	-	-	246	326
	1999	13	15	58	-	-	-	-	-	120	206
Metsä	1992	9,6	85	27	-	23	-	-	77	-	220
	1994	16	19	-	-	-	-	-	-	-	35
	1997	6	8	-	-	-	-	-	32	-	46
	1999	0,3	8,4	-	-	O ₃ ²	-	-	34	-	43
Sadot	1992	2,5	55	13	-	25	-	-	130	-	220
	1994	-	-	-	-	-	-	-	63	-	63
	1997	-	O ₃ ²	-	-	O ₃ ²	-	-	63	-	63
	1999	-	O ₃ ²	-	-	O ₃ ²	-	-	24	-	24
Ilmasto	1992	-	-	-	-	-	-	1 500	-	-	1 500
	1994	-	-	-	-	-	-	97	-	-	97
	1997	-	-	-	-	-	-	2 089	-	-	2 103
	1999	-	-	-	-	-	-	2 224	-	-	2 224
Yhteensä	1992	37	230	610	-	80	-	1 500	207	-	2 650
	1994	37	19	1 581	-	1 137	46	97	63	-	2 980
	1997	59	152	895	-	478	46	2 089	95	746	4 574
	1999	57	401	2 506	32	O ₃ ²	-	2 224	130	120	5 471

¹ Vuosien 1992, 1994 ja 1997 tutkimuksissa on tarkasteltu vuoden 1990 päästöjä. Tässä selvityksessä (1999) on tarkasteltu vuoden 1996 päästöjä.

² Hiilivetyjen haitat sisältyvät otsonin aiheuttamiin metsä- ja satovaurioihin sekä ilmastomuutoksen aiheuttamiin haittoihin.

³ Resuspension aiheuttamat terveysvaikutukset on kohdistettu eri päästökomponenteille.

⁴ Tässä ja vuoden 1997 selvityksessä sulfaatin ja nitraatin aiheuttamat terveys- ja materiaali-vaikutukset on kohdistettu rikki- ja typpipäästöille. Vuoden 1992 tutkimuksessa nämä on kohdistettu hiukkasille.

Tässä selvityksessä polttoaineketjujen alkupään haitat arvioitiin 44 milj. markaksi ja ulkomaille kulkeutuvien päästöjen haitat 346 milj. markaksi eli yhteensä 390 milj. markaksi vuodessa. Vuoden 1997 selvityksessä haittoiksi arvioitiin yhteensä 240 - 910 milj. mk parhaan arvion ollessa 870 milj. markkaa. Vuonna 1994 julkaistussa selvityksessä vastaava haitta-arvio oli 760 milj. mk. Vuoden 1992 selvityksessä ei tehty arviota päästöjen vaikutuksista ulkomaille. Tässä selvityksessä on ensimmäisen kerran arvioitu tievalaistuksen sähkönkäytön haitat, joiksi arvioitiin noin 6 milj. mk vuodessa ja Tielaitoksen työkonien polttoaineen käytön haitat, joiksi arvioitiin vajaa miljoona markkaa vuodessa.

7. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Henkilöautojen liikennesuorite oli 34 850 milj. km, pakettiautojen 3 796 milj. km, linja-autojen 903 milj. km ja kuorma-autojen 2 950 milj. km vuonna 1996. Bensiinin kulutus oli 1,8 milj. tonnia ja dieselin kulutus 1,5 milj. tonnia. Bensiinistä 0,92 milj. tonnia ja dieselistä 0,77 milj. tonnia arvioitiin kuluvan taajamissa ja bensiinistä 0,85 milj. tonnia ja dieselistä 0,74 milj. tonnia haja-asutusalueilla.

Polttoaineiden käytöstä syntyneet päästöt on tilastoitu LIISA 96-laskentajärjestelmässä. Tieliikenteen päästöt vuonna 1996 olivat seuraavat: rikkidioksidia (SO_2) 1 180 t, typen oksideja (NO_x) 127 000 t, hiukkasia 7 560 t, hiilimonoksidia (CO) 296 000 t, hiilivetyjä (HC) 49 000 t, metaania (CH_4) 2 490 t, typpioksiduulia (N_2O) 934 t, ja hiilidioksidia (CO_2) 10,3 milj. tonnia.

Tieliikenteen polttonesteiden käytön haitoiksi Suomessa arvioitiin noin 5,5 miljardia markkaa vuodessa. Haitoista valtaosa muodostuu terveysvaikutuksista ja ilmastonmuutoksen vaikutuksista. Polttoaineketjujen alkupään haitoiksi arvioitiin lisäksi noin 40 milj. mk vuodessa. Lisäksi työkoneiden ja lauttojen kuluttaman dieselin ja kevyen polttoöljyn haitoiksi arvioitiin noin miljoona markkaa.

Tieinfrastruktuurin sähkönkulutus oli noin 100 GWh vuonna 1996. Infrastruktuurin kuluttaman sähkön hankinnan haitoiksi arvioitiin kulutetulle sähkölle 5,5 p/kWh ja vuositasolla yhteensä vajaa 6 milj. mk, mitä vastaavat polttoaineketjujen alkupään haitat arvioitiin 0,2 milj. markaksi vuodessa. Arviossa on mukana 1,5 % siirtohäviö. Osa Suomessa syntyvistä tieliikenteen päästöistä kulkeutuu ulkomaille. Näiden päästöjen haitoiksi arvioitiin 350 milj. mk vuodessa.

Täten tieliikenteen haitta-arvioksi muodostuu yhteensä 5,9 miljardia markkaa. Yhteen-veto haitoista on esitetty taulukossa 7-1.

Taulukko 7-1 Tieliikenteen aiheuttamat ympäristökustannukset, milj. mk/a (1997 rahassa). Lukuja on pyöristetty.

	Taajamat	Haja-asu- tusalueet	Yhteensä
Kuolleisuusriski	2 060	120	2 200
Sairastuvuusriski	730	70	790
Materiaalien korroosio	12	0,4	13
Likaantuminen	190	5	190
Metsien happamoituminen		9	89
Metsien otsonivauriot		34	34
Satovauriot		24	24
Ilmastonmuutos	1 150	1 080	2 220
Yhteensä, milj. mk/a	4 100	1 300	5 500
Työkoneiden päästöt			1
Infrastruktuurin sähkönkulutus			6
Polttoaineketjujen alkupää			40
Ulkomaille kulkeutuvat päästöt			350
Yhteensä, milj. mk/a			5 900

Haitta-arviot suhteutettiin myös eri ajoneuvotyyppien suoritteisiin (ks. taulukko 7-2). Mikäli polttoaineketjujen alkupään haitat otetaan huomioon, bensiinikäyttöisten ajoneuvojen haitta-arvioihin lisättävä 1,2 % ja dieselkäyttöisten 0,6 %. Samoin, jos ulkomaille kulkeutuvat päästöt otetaan huomioon, on bensiinikäyttöisten ajoneuvojen haitta-arvioihin lisättävä 7,7 % ja dieselkäyttöisten ajoneuvojen 5,6 %.

Taulukko 7-2 Eri ajoneuvojen haitat taajamissa ja haja-asutusalueilla tapahtuvassa liikennöinnissä sekä keskimäärin, p/ajoneuvo-km (1997 rahassa)

Ajoneuvo	Taajamat	Haja-asutusalueet - p / ajoneuvo-km -	Keskimäärin
Henkilöautot, ei katalysaattoria	9,1	4,5	6,7
Henkilöautot, katalysaattori	5,6	3,7	4,6
Henkilöautot, diesel	35	3,9	19
Pakettiautot, ei katalysaattoria	13	6,6	11
Pakettiautot, katalysaattori	7,8	5,4	6,8
Pakettiautot, diesel	22	6,4	16
Linja-autot	120	19	79
Kuorma-autot, ei perävaunua	95	17	59
Kuorma-autot, perävaunu	128	25	50

Mikäli haitat kohdistetaan polttoaineiden käytölle, saadaan haitta-arvioksi bensiinille 0,82 mk/litra ja dieselille 2,02 mk/litra.

Taulukkoon 7-3 on koottu Euroopan komission rahoittamassa ExternE Transport -projektissa saatuja tuloksia. Yksityiskohtaisemmin tulokset on koottu liitteeseen 1. Tässä selvityksessä saadut tulokset on laskettu erityisesti terveysvaikutusten ja ilmastomuutoksen haittojen osalta samoin periaattein, joten tulokset ovat sikäli vertailukelpoisia. Toisaalta tulokset ovat hyvin paikkakohtaisia ja esimerkiksi käytetyn kaluston tekniset ominaisuudet ja ikä vaikuttavat voimakkaasti tuloksiin.

Taulukko 7-3 ExternE Transport -projektissa saatuja tuloksia, p/ajoneuvo-km (1995 rahassa)

Ajoneuvo / Ajomatka	Saksa: Stuttgartin sisäinen	Saksa: Stuttgart- Mannheim	Alankomaat: Tielin alu- eella	Iso-Britannia: Barnsleyn si- säinen
Henkilöautot, ei katalysaattoria	22	25	-	22
Henkilöautot, katalysaattori	7,2	6 - 10	-	
Henkilöautot, diesel	29 - 38	14 - 18	33 - 106	75
Pakettiautot, ei katalysaattoria	23	32	-	14
Pakettiautot, katalysaattori	11	12	-	
Pakettiautot, diesel	48 - 67	25 - 36	-	78
Linja-autot, diesel	284 - 535	163 - 217	189 - 457	177
Kuorma-autot ¹	164 - 611	75 - 281	-	67 - 476

¹ Tulokset ovat voimakkaasti riippuvaisia kuorma-autojen iästä ja kokoluokasta.

Suomessa saadut tulokset ovat pääsääntöisesti alhaisempia kuin ExternE:ssä saadut. Eräiden ajoneuvojen kuten esimerkiksi katalysaattorilla varustettujen henkilöautojen kohdalla ero ei ole kuitenkaan kovin selkeä. ExternE:n tapaustarkasteluissa pitoisuudet on laskettu käyttäen hyväksi leviämismalleja, jotka eivät ota huomioon resuspension vaikutusta ja tuottavat täten lieviä aliarvioita haitasta.

Tässä selvityksessä saadut tulokset on aiheellista päivittää parin vuoden välein. Alan tutkimustyö on vilkasta ja arvotettavissa olevien vaikutusten määrä sekä tarkkuus paranevat tutkimuksen edistyessä. Muita syitä päivitystarpeeseen voivat olla esimerkiksi merkittävät muutokset käytössä olevassa ajoneuvokannassa, polttoaineissa tai yleinen kustannustason muutos. Myös pitoisuusarvot ovat varsin kriittinen parametri, ja mikäli on mahdollista käyttää hyväksi malleja ja suorittaa esimerkiksi leviämismallilaskelmia, saattavat tulokset tarkentua merkittävästi.

Mikäli vuoden 1997 rahassa raportoidut ympäristökustannukset halutaan muuttaa muihin tarkasteluvuosiin indekseihin, suositellut indeksit vaihtelevat vaikutusluokittain. Suositellut indeksit ovat:

- terveysvaikutuksille (kuolleisuus- ja sairastuvuusriski) kuluttajahintaindeksi, mikäli muutos koskee alle viiden vuoden ajanjaksoa, muutoin elinkustannusindeksi
- materiaalien syöpymiselle rakennuskustannusindeksi
- materiaalien likaantumiselle kuluttajahintaindeksi, mikäli muutos koskee alle viiden vuoden ajanjaksoa, muutoin elinkustannusindeksi
- metsävaurioille (happamoitumisen ja otsonin aiheuttamat vauriot) raaka-aineiden ja puutavaran tukkuhintaindeksi
- satotappioille ensisijaisesti viljatuotteiden ja perunan osalta muutos EU-maiden keskimääräisissä tuottajahinnoissa ja rehujen osalta muutokset tuotantokustannuksissa Suomessa ja toissijaisesti maataloustuotteiden tukkuhintaindeksi
- ilmastonmuutoksen vaikutuksille OECD-maiden BKT-indeksi

Jos muodossa p/ajoneuvo-km raportoidut ympäristökustannukset halutaan muuttaa vuoden 1997 rahasta muihin tarkasteluvuosiin indekseihin, saadaan likimääräinen arvio seuraavasti:

- taajamissa 70 % haitta-arviosta muunnetaan käyttäen kuluttajahintaindeksiä ja 30 % OECD-maiden BKT-indeksiä
- haja-asutusalueilla 20 % haitta-arviosta muunnetaan käyttäen kuluttajahintaindeksiä ja 20 % OECD-maiden BKT-indeksiä
- keskimääräisessä arviossa 60 % haitta-arviosta muunnetaan käyttäen kuluttajahintaindeksiä ja 40 % OECD-maiden BKT-indeksiä

LÄHDELUETTELO

Aarnio P., Hämekoski K. ja Koskentalo T. (1998): Ilmanlaatu pääkaupunkiseudulla vuonna 1997, PJS C 1998:1, Helsinki.

AEA Technology, Eyre Energy Environment, Metroeconomica (1997): Cost Benefit Analysis of Proposals Under the UNECE Multi-Pollutant, Multi-Effect Protocol. Draft Final Report for the Department of the Environment, Transport and Regions. Restricted - Commercial.

Abbey D.E., Lebowitz M.D., Mills P.K., Petersen F.F., Lawrence Beeson W. ja Burchette R.J. (1995): Long-term ambient concentrations of particulates and oxidants and development of chronic disease in a cohort of nonsmoking California residents. *Inhalation Toxicology* 7, 19-34.

Ahonen A. ja Leiviskä V. (1993): Energiaturpeen tuotanto- ja käyttöketjun ympäristöhaittojen arvottaminen. University of Oulu, Research Institute of Northern Finland, Research Reports 112. Oulu.

Anderson H.R., Ponce de Leon A., Bland J.M., Bower J.S. ja Strachan D.P. (1996): Air pollution and daily mortality in London: 1987-92. *BMJ* 312: 665-669.

Dab W., Quenel S.M.P., Le Moullec Y., Le Tertre A., Thelot B., Monteil C., Lameloise P., Pirard P., Momas I. ja Ferry B. (1996): Short term respiratory health effects of ambient air pollution: results of the APHEA project in Paris. *J Epidem Comm Health* 50 (suppl 1): 42-46.

Dockery D.W., Speizer F.E., Stram D.O., Ware J.H., Spengler J.D. ja Ferries B.G. (1989): Effects of inhalable particles on respiratory health of children. *Am Rev Respir Dis* 139: 587-594.

Dusseldorp A., Kruize H., Brunekreef B., Hofschreuder P., de Meer G. ja van Oudvorst A.B. (1995): Association of PM₁₀ and airborne iron with respiratory health of adults near a steel factory. *Am J Respir Crit Care Med* 152, 1932-1939.

Energia-Ekono Oy (Otterström T., Laurikka H., Gynther L.) (1998a): Tuulivoiman ja aurinkosähkön kilpailukyky ympäristöhyödyt huomioon ottaen. Selvitys 60K00794. Espoo.

Energia-Ekono Oy (Gynther L., Otterström T., Vesa P.) (1998b): Halukkuus maksaa puhtaammasta ilmanlaadusta. Selvitys 60P00684. TEKES, SIHTI 2-tutkimusohjelma. Espoo.

Energia-Ekono Oy (Gynther L., Otterström T., Hämekoski K., Paavola M.) (1998c): Suomen rautatieliikenteen polttoaineperäisten päästöjen aiheuttamat ympäristökustannukset. Ratahallintokeskus. Espoo.

Energia-Ekono Oy ja Maa ja Vesi Oy (Otterström T., Rissanen H., Siitonen S., Sarin S., Kosonen M., Lappalainen R., Gustafsson R.) (1997): Polttoaineketjujen paikalliset ympäristövaikutukset. Selvitys 60P00650. TEKES, SIHTI 2-tutkimusohjelma. Espoo.

Energia-Ekono Oy (Otterström T.) (1994): Tieliikenteen polttoaineperäisten päästöjen vaikutusten arvottaminen. MOBILE-tutkimusohjelma. Espoo.

Energia-Ekono Oy (Rissanen H., Leino P., Vitikka A. ja Otterström T.) (1993): Polttoaineiden tuotanto- ja käyttöketjujen ympäristöpäästöt. TEKES, SIHTI 1-ohjelma. Espoo.

Euroopan komissio (1998): Quality Indicators for Transport Systems (QUITS). TRANSPORT Programme.

Euroopan komissio (valmistuu 1999): Pricing European Transport Systems (PETS). TRANSPORT Programme.

Euroopan komissio (valmistuu 1999): Methodological Framework to evaluate Real Transport Costs (FISCUS Work Package 2). TRANSPORT Programme. Käsikirjoitus

Euroopan komissio (1997a): External Costs of Transport in ExternE. JOULE III Programme. Bickel B., Schmid S., Krewitt W. ja Friedrich R. IER (toim.).

Euroopan komissio (1997b): The National Implementation in the EU of the ExternE Accounting Framework.

EUROSTAT, Statistical Office of the European Communities (1998): Agricultural Prices 2/1998. Luxemburg.

Fankhauser S. (1994): The Social Costs of Greenhouse Gas Emissions: An Expected Value Approach. Energy Journal 15(2): 157-184.

Frischknecht R., Hofstetter P., Knoepfel I., Dones R. ja Zollinger E. (1994): Ökoinventare fuer Energiesysteme. ETH Eidgenössische Technische Hochschule. Zuerich 1994.

Hasund K., Hedvåg L. ja Pleijel H. (1990): Ekonomiska konsekvenser av det marknära ozonets påverkan på jordbruksgrödor. Naturvårdsverket, rapport 3862. Solna.

Hiltunen V., Kartastenpää R., Pohjola V. ja Valkonen E. (1993): Liikenteen aiheuttamien epäpuhtauksien leviäminen ympäristöön, Ilmatieteen laitos, ilmanlaatuosasto, Helsinki

Hosiokangas, J. (1995): Yhdyskuntailman PM_{10} -hiukkasten alkuperän määrittäminen reseptorimallin avulla. Pro gradu-tutkielma, Kuopion yliopisto.

Ilmatieteen laitos (1998): Ilmanlaatumittauksia 1996. Helsinki

Ilmatieteen laitos (1997): Ilmanlaatumittauksia 1995. Helsinki.

Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC (1992): Climate Change 1992. The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment. Cambridge University Press. Cambridge.

Kansaneläkelaitos (1996): Kansaneläkelaitoksen tilastollinen vuosikirja 1995.

Karppinen A., Kukkonen J., Härkönen, J. ym. (1995): Liikenteen vaikutus ilmanlaatuun kaupungeissa - leviämislaskelmat ja niiden vertaaminen mittaustuloksiin, teoksessa: Vuosikirja 1995, MOBILE-2, VTT Energia, Moottoritekniikka, Espoo, 217 - 239.

Kauppi P., Anttila P., Karjalainen-Balk L., Kenttämies K., Kämäri J. ja Savolainen I. (1990): Happamoituminen Suomessa. HAPRO:n loppuraportti. Ympäristöministeriö, Ympäristönsuojeluosasto, Sarja A 89 1990.

Keiserås Bakkane K. (1994): Life Cycle Data for Norwegian oil and gas, Tapir Publishers 1994.

Keuhkovammaliitto: WWW-sivut osoitteessa <http://keuhkovammaliitto.fi/info/sairaudet.htm>

Komiteamietintö 1991:21. Hiilidioksiditoimikunnan mietintö. Ympäristöministeriö.

Konjunkturinstitutet och Statistiska Centralbyrån (1994): Svenska miljöräkenskaper (SWEAA). Stockholm.

Krupnick A.J., Harrington W. ja Ostro B. (1990): Ambient ozone and acute health effects: Evidence from daily data. J. Environ Econ Manage 18, 1-18.

Kucera V., Henriksen J., Knotkova D. ja Sjöström C. (1993): Model For Calculations of Corrosion Cost Caused by Air Pollution and its Application in Three Cities. 10th European Corrosion Congress in Barcelona, July 1993.

Laukkanen T. (1990). Kokonaisleijuma Helsingissä, Pääkaupunkiseudun julkaisusarja C 1990:2 Pääkaupunkiseudun yhteistyövaltuuskunta (YTV). Helsinki.

Laukkanen T. ja Jouttijärvi T. (1990): Energiantuotannon ja tieliikenteen hiukkaspäästöt ja arvioita niiden vaikutuksista ilmanlaatuun. Pääkaupunkiseudun julkaisusarja C 1990:10. Pääkaupunkiseudun yhteistyövaltuuskunta (YTV). Helsinki

Lindfors V., Laurila T. ja Hakola H., (1995): A Model Study of Photochemical Oxidant Formation in the Finnish Environmental Conditions, teoksessa: Proceedings of the 10th World Clean Air Congress, Vol.2., The Finnish Air Pollution Prevention Society, Helsinki.

Maddison D. (1994): The Shadow Price of Greenhouse Gases and Aerosols. Centre for Social and Economic Research on the Global Environment, University College London and University of East Anglia.

Metsäntutkimuslaitos (1997): Metsätilastollinen vuosikirja 1997. Maa- ja metsätalous 1997:4. Helsinki.

Mäkelä K., Kanner H. ja Laurikko J. (1996): Suomen tieliikenteen pakokaasupäästöt, Liisa 95 -laskentajärjestelmä. VTT tiedotteita 1772.

Mäkelä K., Tuominen A. ja Pääkkönen E. (1997): Suomen liikenteen päästöjen laskentajärjestelmä LIPASTO96. VTT tutkimusraportti 429.

Mäkelä K., Tuominen A. ja Pääkkönen E. (1998): Suomen rautatieliikenteen päästöjen laskentajärjestelmä RAILI 96. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 2/1998. Helsinki.

Naturvårdsverket (1998): Increase in number of diesel cars is counterproductive for environmental goals. Lehdistötiedote 10.11.1998.

Nilsson S. (toim.) (1991): European Forest Decline: The Effects of Air Pollutants and Suggested Remedial Policies. International Institute for Applied Systems Analysis. Luxemburg, Austria.

Ojanen C., Pakkanen T., Aurela, M., Mäkelä T. Meriläinen J., Hillamo, R., Aarnio P. Koskentalo T., Hämekoski K., Rantanen L ja Lappi M. (1998): Hengitettävien hiukkasten kokojakauma, koostumus ja lähteet pääkaupunkiseudulla, Pääkaupunkiseudun julkaisusarja C 1998:7, Helsinki.

Ostro B.D. (1987): Air pollution and morbidity revisited: A specification test. J Environ Econ Manage 14, 87-98.

Ostro B.D. ja Rothschild S. (1989): Air pollution and acute respiratory morbidity: An observational study of multiple pollutants. Environ Res 50, 238-247.

Pearce D.W., Cline W.R., Achanta A.N., Fankhauser S., Pachauri R.K., Tol R.S.J. ja Vellinga P. (1996): The Social Costs of Climate Change: Greenhouse Damage and the Benefits of Control. In Bruce J.P., Lee H., ja Haites E.F. (Eds.) Climate Change 1995 - Economic and Social Dimensions of Climate Change. Working Group III Report of the Second Assessment Report of the IPCC. Cambridge.

Pesonen R., Rantakrans E., Pieterila H., ym. (1996): Typen oksidien leviämislaskelmat pääkaupunkiseudulla. Ilmatieteen laitos, ilmanlaatu, Helsinki.

Pietarila H., Pesonen R., Jokinen R., ym. (1997a): Rovaniemen seudun ilmanlaatatutkimus. Ilmatieteen laitos, ilmanlaatu. Helsinki.

Pietarila H., Rantakrans E., Pesonen R., ja Rasila T. (1997b): Heinolan ilmanlaatatutkimus. Ilmatieteen laitos, ilmanlaatu. Helsinki.

Pilkington A. ja Hurley F. (1997): Cancer risk estimate. Institute of Occupational Medicine (IOM) Edinburgh, UK.

Ponce de Leon A., Anderson H.R., Bland J.M., Strachan D.P. ja Bower J. (1996): Effects of air pollution on daily hospital admissions for respiratory disease in London between 1987-88 and 1991-92. J Epidemiol Comm Health 50 (suppl 1): S63-70.

Pope C.A. III, Thun M.J., Nimboodiri M.M., Dockery D.W., Evans J.S. Speizer F.E. ja Heath C.W. Jr. (1995): Particulate air pollution as predictor of mortality in a prospective study of US adults. *Am J Resp Crit Care Med* 151: 669-674

Pope C.A. ja Dockery D.W. (1992): Acute health effects of PM10 pollution on symptomatic and asymptomatic children. *Am Rev Respir Dis* 145, 1123-1126.

Rabl A., Curtiss P.S., Spadaro J.V., Hernandez B., Pons A., Dreicer M., Tort V., Margerie H., Landrieu G., Desaignes B. ja Proult D. (1996): Environmental Impacts and Costs: the Nuclear and the Fossil Fuel Cycles. Report to EC, DG XII, Version 3.0 June 1996. ARMINES (Ecole des Mines). Paris.

Roemer W., Hoek G. ja Brunekreef B. (1993): Effect of ambient winter air pollution on respiratory health of children with chronic respiratory symptoms. *Am Rev Respir Dis* 147, 118-124.

Saari H., Salmi T. ja Kartastenpää R. (1996): Taajamien ilmanlaatu suhteessa uusiin ohjearvoihin, Ilmatieteen laitos, ilmanlaatu, Helsinki.

Schwartz J. ja Morris R. (1995): Air pollution and hospital admissions for cardiovascular disease in Detroit, Michigan. *Am J Epidem* 142, 23-35. *Am J Epidem* 137, 701-705.

Seppälä J. ja Jouttijärvi T. (1997): Metsäteollisuus ja ympäristö. Suomen ympäristökeskus: Suomen ympäristö 89. Helsinki.

Spix C. ja Wichmann H.E. (1996): Daily mortality and air pollutants: findings from Köln, Germany. *J Epidem Comm Health* 50 (suppl 1): S52-S58.

Sunyer J., Castellsague J., Saez M., Tobias A. ja Anto J.M. (1996): Air pollution and mortality in Barcelona. *J Epidem Comm Health* 50 (suppl 1): S76-S80.

Survo K. ja Hänninen O. (1998): Altistuminen ympäristömelulle Suomessa, esiselvitys. Suomen ympäristö 241. Pohjois-Savon ympäristökeskus. Kuopio.

Sverdrup H., Warfvinge P. ja Nihlgaard B. (1993): Assessment of soil acidification effects on forest growth in Sweden. *Accepted Water, Air and Soil Pollution Journal*, 1993.

Tielaitos, toimeksiannosta Ekono Ympäristötekniikka (1992): Tieliikenteen päästöjen haittojen kustannukset. Tiehallituksen sisäisiä julkaisuja 3/1992.

Tielaitos, toimeksiannosta Energia-Ekono Oy (1997): Tieliikenteen päästöjen arvottaminen. Tielaitoksen selvitykset 8-9/1997.

Tilastokeskus (1998): www-sivut, ympäristötilastot.

Tilastokeskus (1997a): Väestörakenne 1996. Väestö 1997:7. Helsinki.

Tilastokeskus (1997b): Luonnonvarat ja ympäristö 1997. Ympäristö 1997:10. Helsinki.

Tilastokeskus (1997c): Tilastollinen vuosikirja 1996. Helsinki.

Tilastokeskus (1996): Energiatilasto 1995. Helsinki.

Tilastokeskus (1994): Ympäristötilasto. Ympäristö 1994:3. Helsinki.

Touloumi G., Samoli E. ja Katsouyanni K. (1996): Daily mortality and 'winter type' air pollution in Athens, Greece - a time series analysis within the APHEA project. *J Epidemiol Comm Health* 50 (suppl 1): 47-51.

Verhoeff A.P., Hoek G., Schwartz J. ja van Wijnen J.H. (1996): Air pollution and daily mortality in Amsterdam. *Epidemiology* 7, 225-230.

Wahlström E., Hallanaro E-L. ja Manninen S. (toim.) (1996): Suomen ympäristön tulevaisuus. Suomen ympäristökeskus. Helsinki.

Watson R.T., Rodhe, H., Oescher H. ja Siegenthaler U. (1990): Green house gases and aerosols. Julkaisussa: Houghton J.T., Jenking G.J. ja Ephraums J.J. (toim.). *Climate Change, The IPCC Scientific Assessment*. Cambridge University Press. Cambridge.

Whittemore A.S. ja Korn E.L. (1980): Asthma and air pollution in the Los Angeles area. *Am J Public Health* 70, 687-696.

World Bank (1994): Staff appraisal report, Russian Federation, Second oil rehabilitation project.

Wordley J., Walters S. ja Ayres J.G. (1997): Short term variations in hospital admissions and mortality and particulate air pollution. *Carcinogenic Effects of Radionuclide Emissions*.

HAASTATTELUT JA TIEDONANNOT:

Maaseutukeskusten liitto (1998): Suullinen tiedonanto. Kuivaheinän ja säilörehun tuotantokustannukset 1996-1997.

Mäkelä K. (1997): Kirjallinen tiedonanto. Suomen tieliikenteen pakokaasupäästöt. LII-SA 96. VTT 1997. Espoo.

Neste Oy (1997): Ekotasetiedote, Eurodieselöljy 31.12.1997.

Ossi Kaurala, Neste Oy (1998): Suullinen tiedonanto. Öljytuotteet. 12/98.

Liite 1

ExternE Transport -tapaustarkasteluja

Maa	Matka	Ajoneuvo, tyyppi	Yksikköarvo, p/ajoneuvo-km
Ranska	Pariisin sisäinen	henkilöauto, katalysaattori	45
		henkilöauto, diesel	330
	Pariisi-Lyon	linja-auto, kaupunkiliikenne	5 615
		linja-auto, kaupunkiliikenne	924
		suurnopeusjuna	65
		henkilöauto, ei katalysaattoria	64
		henkilöauto, katalysaattori	18
		henkilöauto, diesel	32
Saksa	Stuttgartin sisäinen	henkilöauto	22
		henkilöauto, EURO 2	5,9
		henkilöauto 90-luvulta, katalysaattori	7,2
		henkilöauto 90-luvulta, diesel	29
		henkilöauto 80-luvulta, diesel	38
		linja-auto 80-luvulta, pitkänmatkan	535
		linja-auto, EURO 1, pitkänmatkan	409
		linja-auto 80-luvulta, kaupunkiliikenne	372
		linja-auto, EURO 1, kaupunkiliikenne	284
		raitiotievaunu	11
		pakettiauto 80-luvulta	23
		pakettiauto, katalysaattori	11
		pakettiauto, EURO 2	7,0
		pakettiauto 90-luvulta, diesel	67
		pakettiauto, EURO 1 diesel	48
		kuorma-auto 80-luvulta < 7.5	208
		kuorma-auto, EURO 1 < 7.5	164
		kuorma-auto 80-luvulta, 14-20	466
		kuorma-auto, EURO 1, 14-20	361
	Stuttgart-Mannheim	kuorma-auto 80-luvulta, perävaunu 20-28	379
		kuorma-auto 80-luvulta, perävaunu >32	611
		henkilöauto	25
		henkilöauto, EURO 2	4,5
		henkilöauto 90-luvulta, katalysaattori	6,0
		henkilöauto 80-luvulta, katalysaattori	10
		henkilöauto 90-luvulta, diesel	14
		henkilöauto 80-luvulta, diesel	18
		linja-auto 80-luvulta, pitkänmatkan	217
		linja-auto, EURO 1, kaupunkiliikenne	163
		paikallisjuna	97
		inter-city-juna	294
		suurnopeusjuna	424
		pakettiauto 80-luvulta	32
		pakettiauto, katalysaattori	12
		pakettiauto, EURO 2	5,8
		pakettiauto 90-luvulta, diesel	36
		pakettiauto, EURO 1, diesel	25
		kuorma-auto 80-luvulta < 7.5	97
		kuorma-auto, EURO 1 < 7.5	75
		kuorma-auto 80-luvulta, 14-20	184
		kuorma-auto, EURO 1 14-20	140
		kuorma-auto 80-luvulta, perävaunu 20-28	179
		kuorma-auto 80-luvulta, perävaunu >32	281

Elinkaarianalyysi		tavarajuna	566
		henkilöauto	7,7
		henkilöauto, diesel	6,1
		pakettiauto	9,3
		kuorma-auto 16 t	18
		kuorma-auto 28 t	27
		kuorma-auto 40 t	40
		linja-auto, pitkänmatkan	24
		linja-auto, kaupunkiliikenne	24
		paikallisjuna	103
		inter-city-juna	324
		suurnopeusjuna	850
		raitiotievaunu	49
		tavarajuna	934
Kreikka	Ateenan sisäinen	henkilöauto, katalysaattori, lämmin moottori	5,3 - 5,7
		henkilöauto, katalysaattori, kylmä moottori	9,5
		johdinbussi	2,2
		henkilöauto, moottoritie 80-100 km/h	4,9
		henkilöauto, kaupunkialueen päätiet	8,8
	Ateena-Thessaloniki	kuorma-auto >16 t, moottoritie 80-100 km/h	253
		kuorma-auto >16 t, kaupunkialueen päätiet	2 061
		dieseljuna, kaupungeissa	10 962
		dieseljuna, maaseudulla	849
Italia	Milanon sisäinen	henkilöauto, katalysaattori	3,5
		henkilöauto, diesel	952
Alankomaat	Amsterdamin sisäinen Amsterdam-Schiphol Schiphol-Rotterdam Rotterdam-Nijmegen Tielin alueella	henkilöauto	13 - 19
		henkilöauto, katalysaattori (1990)	4,3 - 4,5
		henkilöauto, keskimäärin	5,5 - 7,3
		henkilöauto katalysaattori (2000)	2,5 - 3,0
		henkilöauto, diesel, suorasuihku (1990)	45 - 49
		henkilöauto, diesel, suorasuihku (1990)	69 - 106
		henkilöauto, diesel, keskimäärin (1990)	33 - 50
		henkilöauto, diesel, suorasuihku (2000)	17 - 24
		LPG auto (1990)	10 - 12
		LPG auto, katalysaattori (1990)	4,9 - 5,1
		LPG auto keskimäärin (1990)	5,1 - 5,5
		LPG auto, katalysaattori (2000)	2,6 - 2,9
		linja-auto, diesel (1990)	189 - 457
		linja-auto, diesel (2000)	29 - 60
		juna (sähkö), usein pysähtelevä	89
		inter-city-juna (sähkö)	73
		suurnopeusjuna (sähkö)	175
		raitiotievaunu, keskimäärin (1995)	45
		metro, keskimäärin (1995)	67
Iso-Britannia	Lontoon sisäinen	henkilöauto, keskimäärin	34
		linja-auto, keskimäärin	408
		linja-auto (moderni)	167
		linja-auto (sähkö)	29
		kapearateinen rautatieliikenne (light rail)	116
	Barnsleyn sisäinen	henkilöauto	22
		henkilöauto, diesel	75
		pakettiauto, bensiini	14
		pakettiauto, diesel	78
		kuorma-auto < 17 + pre-EURO	421
		kuorma-auto < 17 + EURO I	201
		kuorma-auto < 17 + EURO II	67
		kuorma-auto > 17 + pre-EURO	476
		kuorma-auto > 17 + EURO I	236
		kuorma-auto > 17 + EURO II	129

linja-auto, diesel	177
linja-auto, nestekaasu	91
linja-auto, maakaasu	42
linja-auto, biometanoli	33
linja-auto, bioetanoli	48
linja-auto, biodiesel	159
linja-auto, sähkö (tuotantomuotona hiilivoi- ma+rikinpoistolaitos)	40
linja-auto, sähkö (tuotantomuotona kaasu- kombilaitos)	22